



Pro gradu -tutkielma
Meteorologia

WRM200 säättutkan ja MRR-2 pienoissadetutkan
tutkaheijastuvuustekijöiden vertailu kesäsateissa 2015 – 2018

Iiris Viljamaa

01.04.2019

Ohjaaja: Elena Saltikoff

Tarkastaja: Dmitri Moisseev, Matti Leskinen

HELSINGIN YLIOPISTO
FYSIKAN LAITOS

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)
00014 Helsingin yliopisto



HELSINGIN YLIOPISTO
HELSINGFORS UNIVERSITET
UNIVERSITY OF HELSINKI

MATEMAATTIS-LUONNONTIEDELLINEN TIEDEKUNTA
MATEMATISK-NATURVETENSKAPLIGA FAKULTETEN
FACULTY OF SCIENCE

Tiedekunta – Fakultet – Faculty		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree programme	
Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta		Ilmakehätieteiden maisteriohjelma	
Tekijä – Författare – Author			
Iiris Ilona Viljamaa			
Työn nimi – Arbetets titel – Title			
WRM200 säätutkan ja MRR-2 pienoissadetutkan tutkaheijastuvuustekijöiden vertailu kesäsateissa 2015 - 2018			
Työn laji – Arbetets art – Level	Aika – Datum – Month and year	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages	
Pro gradu	04/2019	48	
Tiivistelmä – Referat – Abstract			
<p>Säätutkia käytetään sadealueiden liikkeiden ja sateen voimakkuuden arvioimisen. Säätutkan toimintaperiaate perustuu sille, että sen lähettämä mikroaaltopulssi siroaa ilmakehässä olevista partikkeleista kuten vesipisaroista ympäristöönsä, jolloin pieni osa lähetetystä pulssista heijastuu takaisin kohti tutkaa. Tutka vastaanottaa palanneen pulssin ja arvioi sen perusteella sadealueita.</p> <p>Säätutkat ovat mittalaitteita, jotka vaativat toimiakseen säännöllistä huoltoa ja mittaustulosten validointia. Säätutkan kalibrointi on monessa mielessä haasteellista. Tutka on kaukokartoituslaite, jonka keräämä data kattaa alueen aina 250 km säteelle tutkasta. Se ei mittaa suoraan sademäärää, kuten sademittarit yleensä, vaan arvio sen välillisesti tutkaheijastuvuuden kautta.</p> <p>Tämän tutkimuksen tarkoitus on tarkastella uutta mahdollista kalibrointimenetelmää. Uusi menetelmä käyttäisi pienoissadetutkaa MRR-2 vertailukohtana. Myös MRR-2 mittaa tutkaheijastuvuustekijää, joten se voisi olla hyvä vertailupari säätutkalle.</p> <p>Tasaisen sateen otoksessa vuosien 2015-2018 kesäsateissa säätutkan WRM200 ja pienoissadetutkan MRR-2 vertailupisteihin sovitettun suoran yhtälö on $Z_{WRM200} = 0.83 Z_{MRR-2} + 2.01$, jossa Z_{WRM200} on säätutkan ja Z_{MRR-2} on pienoissadetutkan mittaama tutkaheijastuvuustekijä. Tasaisessa sateessa otoksen RMS-virhe on 3,36 dB. Konvektiivisen sateen otoksessa vastaava yhtälö on $Z_{WRM200} = 0.77 Z_{MRR-2} + 3.70$ ja RMS-virhe 5,36 dB. Tasaisessa sateessa verrattavuus on konvektiivisessa sateessa tehtyä vertailua parempi.</p> <p>Tutkimus sisältää pohdintaa tuloksiin vaikuttavista tekijöistä sekä pohdintaa MRR-2:n soveltuvuudesta vertailulaitteeksi säätutkan kalibrointiin. Tutkimuksen pohjalta vaikuttaa siltä, että vaikka vertailunasettelu pyritään tehdä mahdollisimman vakaaksi, ei virhetekijöitä voida sulkea pois. Näin ollen tämän kaltaisella asettelulla ei voida suorittaa tarkkaa säätutkan kalibrointia.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
säätutka, WRM200, pienoissadetutka, MRR-2, tutkaheijastuvuustekijä, vertailu			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Sisältö	
Lyhenteet.....	2
1. JOHDANTO.....	4
2. TUTKAN MITTAUSTEKNIikka.....	5
2.1 Säädetkan yleinen toimintaperiaate.....	5
2.2 Mikroaaltopulssin taittuminen ilmakehässä.....	6
2.3 Mikroaaltopulssin vaimeneminen ilmakehässä.....	6
2.4 Tutkaheijastuvuustekijän määrittäminen.....	7
2.5 Muita tutkasuureita.....	11
2.6 Säädetkatuotteet.....	12
2.7 Säädetkan huolto ja kalibrointi.....	13
3. LAITTEET.....	15
3.1 Tutkaverkko Suomessa.....	15
3.2 Vaisala WRM200 säädetka Ikaalisissa.....	17
3.3 Metek MRR-2 pienoissadetutka Hyytiälässä.....	18
4. MENTELMÄT JA DATA.....	20
4.1 Vertailun asettelu.....	20
4.2 Vertailuun valitut sadetapaukset.....	23
4.3 Tutkimuksessa käytetty data.....	26
4.4 MRR-2 datan puutteet ja rajoitteet.....	26
5. TULOKSET.....	29
5.1 Yksittäiset sadetapaukset aikasarjoissa.....	29
5.1.1 Tasaisen ja konvektiivisen sateen tyypilliset tapaukset.....	29
5.1.2 WRM200:n määrän suojakuvun aiheuttama vaimennus.....	30
5.1.3 WRM200:n signaalin vaimeneminen kovassa vesisateessa.....	32
5.1.4 WRM200:n signaalin voimakas selittämätön vaimeneminen.....	33
5.1.5 Paikka- ja aikaresoluutioiden erojen vaikutus.....	36
5.2 Koko vertailujakso hajontakuvioissa.....	39
6. POHDINTA.....	40
6.1 Otoksen edustavuus.....	41
6.2 Tuloksiin vaikuttavia tekijöitä.....	41
6.3 Pienin mahdollinen havaittava tutkaheijastuvuustekijä.....	42
6.4 Säädetkan katvealueiden vaikutus vertailuun.....	42
6.5 Vertailunasettelun jatkokehitys.....	43
6.6 MRR-2 pienoistutkan hyvät ja huonot puolet.....	44
7. YHTEENVETO.....	45

Lyhenteet

a	Vakio sateen intensiteetin yhtälössä.
A_{eff}	Antennin efektiivinen sieppauspinta-ala.
b	Vakio sateen intensiteetin yhtälössä.
BALTRAD	Yhteistyöprojekti pohjoismaiden ja Baltian maiden kesken.
C	Tutkan ominaisuuksista riippuva tutkavakio.
c	Valon nopeus.
CAPPI	<i>Constant altitude PPI</i> . PPI tuotteista muodostettu tuote vakiokorkeudella.
C_{iris}	IRIS-ohjelmiston tutkavakio
D	<i>Diameter</i> . Pisan halkaisija.
dB	<i>Decibel</i> . Logaritminen mitta-asteikko.
DSD	<i>Drop size distribution</i> . Pesarakokojakauma
EUMETNET	<i>Network of European Meteorological Services</i> . Eurooppalaisten ilmatieteen laitosten yhteistoimintaelin.
ϵ_r	Suhteellinen permittiivisyys.
φ	<i>Fii</i> . Antennin elevaatio suunnan -3 dB keilanleveys radiaaneina
FMCW	<i>Frequency modulated continuous wave</i> . Taajuusmoduloidu jatkuva aallon tutka.
G_r	<i>Gain</i> . Antennin vahvistus vastaanotossa.
G_t	<i>Gain</i> . Antennin vahvistus lähetyksessä.
g_r	Säätutkan kalibroinnista saatava vastaanotinketjun kokonaisvahvistus.
g_{rx}	Säätutkalle määriteltävä vastaanoton aaltoputkihäviöt.
g_{tx}	Säätutkalle määriteltävä lähetyspuolen häviö.
h	Korkeus maanpinnasta.
HTI	<i>Height Time Indicator</i> . Tutkatuote, jossa tutkasuure on esitetty ajan ja korkeuden suhteen.
I_0	Tutkan antennin syötössä redusoitu kohinateho.
IRIS	<i>Interactive Radar Information System</i> . Vaisalan säätutkan ohjelmisto.
$ K $	Dielektrisyystekijä.
λ	<i>Lambda</i> . Aallonpituus.
l	Mittaustilavuuden pituus.
L_{at}	Hapen ja vesihöyryn aiheuttama signaalin vaimeneminen.

LWC	<i>Liquid water content</i> . Vesipitoisuus.
Metek	Meteorologische Messtechnik GmbH. Saksalainen laitevalmistaja.
MRR-2	<i>Micro Rain Radar</i> . Metekin pienoissadetutka.
n	Ilman taitekerroin.
NORDRAD	<i>Nordic Weather Radar Network</i> . Yhteistyöprojekti pohjoismaiden ilmatieteen laitosten kesken.
OPERA	<i>Operational Program on the Exchange of Weather Radar Information</i> . EUMETNET:n alainen säätutkaohjelma, joka tuottaa laadukkaita operatiivisia säätutkatuotteita Euroopan laajuisesta tutkaverkosta.
P_n	Tutkan kalibroinnin yhteydessä mitattu kohinataso vastaanottimen ilmaisimella.
PPI	<i>Plan Position Indicator</i> . Tutkatuote, jossa tutkasuure esitetty pituus- ja leveyspiirin suhteen tietyllä korkeuskulmalta.
P_r	<i>Received power</i> . Säätutkan vastaanottaman signaalin teho.
PRF	<i>Pulse Repetition Frequency</i> . Pulssintoistotaajuus, joka kertoo sekunnissa tuotettujen pulssien lukumäärän.
P_t	<i>Transmitted power</i> . Säätutkan lähettämän signaalin teho.
ρ_w	Veden tiheys.
R	<i>Rainfall</i> . Sateen intensiteetti.
r	<i>Range</i> . Etäisyys tutkasta
RHI	<i>Range Height Indicator</i> . Tutkatuote, jossa tutkasuure esitetty korkeuden ja ajan funktiona.
RMSE	<i>Root mean squared error</i> . Keskineliövirheen neliöjuuri.
S	Signaalin teho antennin syötössä.
σ	<i>Sigma</i> . Säätutkan havaitsema tutkapoikkipinta.
θ	<i>Theeta</i> . Antennin atsimuuttisuunnan -3 dB keilanleveys radiaaneina.
τ	<i>Tau</i> . Lähetyspulssin kesto.
$v(D)$	Pisaroiden putoamisnopeus.
V_{ant}	Mittaustilavuus
WRM200	<i>Weather Radar Magnetron</i> . Vaisalan kaksoispolarisaatiosäätutka magnetron-lähettimellä.
x	Mittaustilavuuden ellipsin muotoisen leikkauspinta-alan vaakasuora säde.
y	Mittaustilavuuden ellipsin muotoisen leikkauspinta-alan pystysuora säde.
Z	Tutkaheijastuvuustekijä
Z_0	Kohinatasoa vastaava tutkaheijastuvuustekijä yhden kilometrin etäisyydellä antennista.
ZDR	Differentiaali tutkaheijastuvuustekijä

1. JOHDANTO

Säätutka on paras laite sään seurantaan, kun ollaan kiinnostuneita sateen määrästä ja sadealueiden liikkeistä. Meteorologeille säätutkatuotteet ovat yksi tärkeimmistä ennusteen laatimisen ja sään seuraamisen apuvälineistä. Lentoliikenne, teiden kunnossapito, maanviljelijät ja pelastusviranomaiset saavat säätutkien ansiosta paljon välttämätöntä tietoa, josta on hyötyä toiminnan suunnittelussa. Tavallinen kansalainen voi hyödyntää säätutkan reaaliaikaista tietoa sadealueista ja niiden liikkeistä esimerkiksi suunnitellessaan pyöräretkeä tai pyykkisen kuivaamista ulkona.

Säätutka lähettää suuritehoisia mikroaaltopulsseja. Mikroaaltopulssit etenevät ilmassa, ja kohdatessaan esteitä osa pulssin tehosta siroaa takaisin kohti tutkaa. Säätutkan vastaanotin havaitsee pienitehoisetkin takaisin siroonnet pulssit. Se mittaa palanneen pulssin tehon ja ajan pulssin lähetysketken ja palaamishetken välillä. Säätutkan avulla saadaan tietoa sateen voimakkuudesta ja etäisyydestä tutkasta. Doppler-tutka havaitsee myös partikkelin nopeuden mikroaaltopulssin etenemisen suuntaan. Kaksoispolarisaatiotutka antaa tietoa myös partikkelin muodosta hyödyntämällä vertikaaliin ja horisontaaliin suuntaan polarisoitujen heijastuneiden pulssien tehoa.

Sateen intensiteetti vaihtelee voimakkaasti ajasta ja paikasta riippuen. Pistemäinen in situ -sademittarilla tehty havainto ei pysty kuvaamaan sateen alueellista vaihtelua. In situ -mittaukseen verrattuna säätutkalla on ylivoimainen kyky mitata sadetta. Säätutka havainnoi säätä jatkuvasti skannaten ympäristöään 360 astetta eri korkeuskulmilla muodostaen näin kolmedimensionaalisen kuvan sadealueista ympärillään.

Tämän työn tarkoitus on selvittää, kuinka hyvin kahden tutkan mittaamat tutkaheijastuvuustekijät vastaavat toisiaan. Näistä WRM200 on Ilmatieteen laitoksen operationaalisessa käytössä oleva Vaisalan valmistama kaksoispolarisaatiotutka. MRR-2 on Helsingin yliopiston tutkimuskäytössä oleva saksalaisen Metekin valmistama pienoissadetutka. Tutkista käytetään tässä tekstissä lyhenteitä WRM200 ja MRR-2. Työn tarkoitus on antaa vastaus kysymykseen, voidaanko MRR-2:sta käyttää referenssinä operatiivisessa käytössä olevien säätutkien kalibroimisessa.

Ensin säätutkat esitellään yleisellä tasolla ja käydään läpi tässä vertailussa käytettyjen tutkien tekniset ominaisuudet. Seuraavaksi esitellään tutkimusmenetelmät ja data, johon tutkimus perustuu. Tämän jälkeen esitellään tutkimuksen tuloksia, sekä pohditaan tuloksiin vaikuttaneita tekijöitä. Lopuksi pohditaan, kuinka hyvä vertailukohta MRR-2 on WRM200:n tutkaheijastuvuustekijää tarkastellessa.

2. SÄÄTUTKAN MITTAUSTEKNIikka

Tutka (engl. radar, sanoista radio detection and ranging) on aktiivinen kaukokartoituslaite. Tässä yhteydessä aktiivinen tarkoittaa sitä, että tutka muodostaa itse sähkömagneettisen signaalin ja mittaa takaisin heijastuvan signaalin tehoa. Kaukokartoitus puolestaan tarkoittaa, että laite ei ole fyysisesti kontaktissa mitattavaan asiaan kuten in situ -mittalaite, vaan se havaitsee välillisesti kaukaisen kohteen lähettämän tai kohteesta heijastuneen signaalin. Radioaallon aallonpituus on 1 mm – 100000 km. Aallonpituusalueen 1 mm – 1 m aaltoja kutsutaan myös mikroaalloiksi.

2.1 Säättutkan yleinen toimintaperiaate

Säättutkan avulla arvioidaan, missä sataa ja kuinka suurella intensiteetillä. Se mittaa sadepartikkelien määrää vaikutustilavuudessa, partikkelien kokoa, muotoa ja etäisyyttä tutkasta. Ensin tutka muodostaa voimakkaan noin 250 kW suuruisen mikroaaltopulssin, jonka se lähettää antennilla kohdistettuun suuntaan. Suomessa käytettävät säättutkat toimivat taajuusalueella C (8 – 4 GHz), joten niiden käyttämä aallonpituusalue on 4 – 8 cm taulukon 1 mukaisesti. Pienoissadetutka MRR-2 toimii taajuusalueella K.

Taulukko 1: Taajuusalueita lyhenteineen (Jensen, 2000, s.289)

Lyhenne	Taajuusalue (GHz)	Aallonpituus (cm)
K _a	40.0 – 26.5	0.75 – 1.18
K	26.5 – 18.0	1.19 – 1.67
K _u	18.0 – 12.5	1.67 – 2.4
X	12.5 – 8.0	2.4 – 3.8
C	8.0 – 4.0	3.9 – 7.5
S	4.0 – 2.0	7.5 – 15.0

Mikroaaltopulssi etenee ilmakehässä. Kohdatessaan partikkeleja kuten sadepisaroi, säteily siroaa ympäristöön, ja osa pulssin tehosta palaa takaisin kohti tutkaa. Tutkan vastaanotin kerää palanneen heikon tehon, joka on kokoluokkaa 10^{-13} – 10^{-8} W (Ilmatieteen laitos). Vastaanotetun pulssin teho on siis 10^{13} – 10^{18} kertaa heikompi verrattuna lähetetyn pulssin tehoon. Vastaanottimelta tieto siirtyy signaaliprosessorille. Signaaliprosessori mittaa palanneen pulssin tehon ja pulssin kulkeman matkan ajan. Lisäksi signaaliprosessori voi määritellä partikkelin koon, muodon ja nopeuden. Tiedot tallennetaan tiedostoon, josta voidaan lopulta muodostaa kuva sadealueista näytölle.

2.2 Mikroaaltopulssin taittuminen ilmakehässä

Mikroaaltopulssin kulkiessa halki ilmakehän sen reittiin vaikuttavat ilman tiheyden muutokset ja maapallon kaarevuus. Sähkömagneettinen säteily taittuu ilmakehässä noudattaen yleisiä sähkömagneettisen säteilyn taittumislakeja. Ilman taitekerroin n eri korkeuksilla h muuttuu ilman tiheyden, lämpötilan ja kosteuden mukaan. Normaalioloissa (lämpötila on 0 °C ja ilmanpaine 1013 hPa) taitekerroin lähellä maanpintaa on 1.0003 (Fabry, 2015, s.20). Taitekertoimen muutoksen ollessa korkeuden suhteen keskimääräinen $dn/dh = -40 \cdot 10^{-6} \text{ km}^{-1}$ puhutaan Fabryn (2015, s. 21-22) mukaan mikroaaltopulssin normaalista etenemisestä. Normaalisessa tilanteessa käytetään laajalti hyväksyttyä sääntöä, jonka mukaan tutkakeilan kaari vastaa kaarta, jonka säde on $4/3$ maapallon säteestä.

Jos dn/dh on normaalia pienempi, taittuminen on heikompaa, jolloin tutkakeila mittaa normaalitilannetta korkeammalla maan pinnasta. Tämä alinormaalitaittuminen on verrattain harvinaista ja esiintyessäänkin heikkoa. Sitä voi tapahtua, jos lämpötila laskee korkeuden funktiona normaalia voimakkaammin tai kosteus laskee korkeuden funktiona normaalia heikommin. (Fabry, 2015, s. 22)

Toisessa normaalista poikkeavassa tilanteessa, jossa dn/dh on normaalia suurempi, taittuminen on keskimääräistä taittumista voimakkaampaa. Olosuhteet ylinormaalille taittumiselle ovat otolliset silloin, kun lämpötila laskee vähemmän korkeuden funktiona kuin normaalisti tai kosteus vähenee voimakkaammin korkeuden funktiona kuin normaalisti. Ilmiö on verrattain yleinen inversioiden, säärintamien, kylmien laskuvirtauksien yhteydessä ja lämpimän ilman virratessa kylmän vesistön yli. Joskus taittuminen on niin voimakasta, että tutkan lähettämä säde taittuu maahan asti. (Fabry, 2015, s. 22)

2.3 Mikroaaltopulssin vaimeneminen ilmakehässä

Tutkan lähettämän mikroaaltopulssi etenee tutkakeilaa pitkin ja etäisyyden kasvaessa sen teho jakaantuu yhä suuremmalle pinta-alalle. Tämän seurauksena mikroaaltopulssin tehotiheys pienenee etäisyyden kasvaessa. Vaimeneminen on suoraan verrannollinen etäisyyden neliöön.

Mikroaaltopulssi vaimenee ilmakehässä myös absorboituessaan kaasuihin, pilvipisaroihin ja sateeseen. Sääntutkan aallonpituuksilla absorboivia kaasuja ovat vesihöyry ja happi. Happi on troposfäärissä tasaisesti sekoittunut, mutta vesihöyryn määrä vaihtelee. Lopulta kaasujen aiheuttama absorptio on kuitenkin heikkoa nestemäisen veden aiheuttamaan vaimenemiseen verrattuna. (Meischner, 2004, s. 34)

Vaimenemista aiheuttaa tutkasäteen reitille osuva vesi (Bringi ja Chandrasekar, 2001, s.160). Pilvipisaroiden vaimentava vaikutus on vielä kaasujenkin vaikutusta pienempää. Jääkiteistä aiheutuva vaimeneminen on tätäkin pienempää, koska jääkiteiden dielektriset ominaisuudet ovat heikompia kuin pilvipisaroilla. Sadepisarat sitä vastoin vaimentavat merkittävästi etenkin lyhyempiaaltoisia taajuusalueen X aaltopulsseja. Myös säätutkissa käytetty taajuusalueen C aaltopulssit vaimenevat, mutta hieman kohtuullisemmin kuin X-alueella. Osa veden aiheuttamasta vaimenemisesta on korjattavissa vaimenemiskertoimen avulla. (Meischner, 2004, s. 34)

2.4 Tutkaheijastuvuustekijän määrittäminen

Tutkaheijastuvuustekijä Z on määritelty Fabryn kirjassa (2015, s.35) yhtälön 1 mukaisesti. Tutkaheijastuvuustekijä riippuu vaikutustilavuudessa olevien partikkelien lukumäärästä N ja pisaroiden halkaisijasta D .

$$Z = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD \quad (1)$$

Tutkaheijastuvuustekijän absoluuttinen yksikkö on mm^6 / m^3 . Yksi halkaisijaltaan 1 mm pisara kuutiometrissä ilmaa vastaa tutkaheijastuvuustekijää $1 \text{ mm}^6 / \text{m}^3$. Kolme 2 mm pisaraa vastaavasti $3 \cdot (2 \text{ mm})^6 / \text{m}^3 = 192 \text{ mm}^6 / \text{m}^3$. Pilvipisaroita vastaa tutkaheijastuvuustekijä noin $0.01 \text{ mm}^6 / \text{m}^3$ kun taas rakeita vastaa noin $10^6 \text{ mm}^6 / \text{m}^3$. Tutkaheijastuvuustekijä saa siis arvoja hyvin suurella skaalalla, mistä syystä tutkaheijastuvuustekijä ilmoitetaan yleensä logaritmisella asteikolla siten, että

$$Z(\text{dBZ}) = 10 \cdot \log_{10} Z(\text{mm}^6 / \text{m}^3). \quad (2)$$

Näin ollen pilvipisaroita vastaa tutkaheijastuvuustekijä noin -20 dBZ ja voimakas sadekuuro ylittää 45 dBZ arvon. (Fabry, 2015, s. 34)

Koska tutkaheijastuvuus on riippuvainen sirottajista mittaustilavuudessa, voidaan arvioida sateen intensiteetti tutkaheijastuvuuden voimakkuudesta.

$$Z = a \cdot R^b \quad (3)$$

Yhtälössä 3 esiintyvät a ja b ovat sadetyypistä riippuvia vakioita ja R sateen intensiteetti.

Tässä työssä verrataan keskenään säätutkan WRM200 ja pienoissadetutkan MRR-2 laskemia tutkaheijastuvuustekijöitä. Tutka ei kuitenkaan mittaa tutkaheijastuvuustekijää suoraan vaan se mittaa takaisinheijastuneen mikroaaltopulssin tehon voimakkuutta.

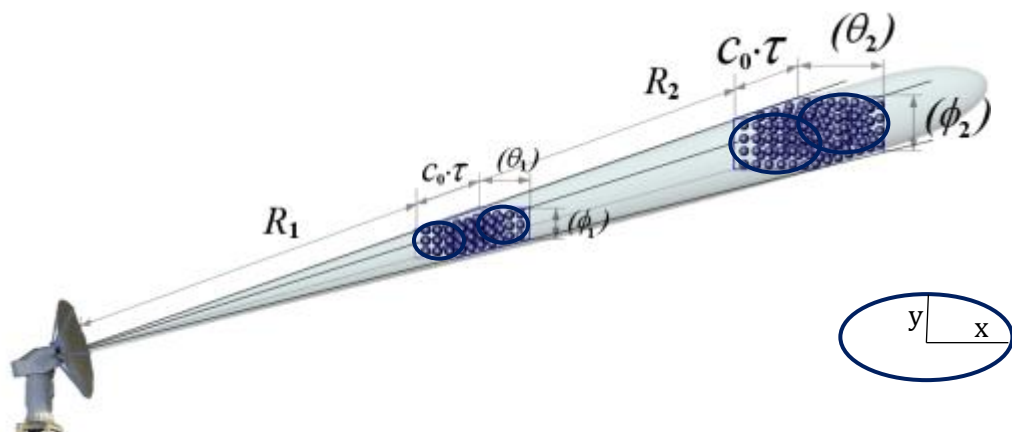
Säätutkan vastaanottama teho P_r (engl. received power) riippuu lähetetyn tehon P_t (engl. transmitted power) voimakkuudesta, tutkan ominaisuuksista, ilmakehässä tapahtuvasta signaalin vaimenemisesta ja sirottavien partikkelien ominaisuuksista. Säätutkan vastaanottimen ilmaisemasta tehosta P_r on laskettavissa tutkaheijastuvuustekijä. Ilmatieteen laitoksen säätutkissa laskennan suorittaa Vaisalan säätutkan ohjelmisto IRIS (engl. sanoista interactive radar information system.). Seuraavat yhtälöt ovat Ilmatieteen laitoksen liitteen (liite 1) mukaiset.

$$P_r = P_t \cdot \frac{G_t}{4\pi r^2} \cdot \sigma \cdot \frac{1}{4\pi r^2} \cdot \frac{1}{L_{at}} \cdot A_{eff} \quad (4)$$

Tutkan ominaisuuksista riippuvia parametreja yhtälössä 4 ovat antennin vahvistus lähetyksessä G_t (engl. gain) ja antennin efektiivinen sieppauspinta-ala A_{eff} . Ilmakehässä etenemisestä riippuvia parametreja ovat etäisyys tutkasta r (engl. range) ja ilmakehässä tapahtuva vaimeneminen L_{at} (engl. atmosphere) sekä säätutkan havaitsema tutkapoikkipinta σ .

$$\sigma = V_{ant} \cdot \frac{1}{\Delta V} \sum_i^n \sigma_i \quad (5)$$

Yhtälössä 5 tutkapoikkipinnan σ määritelmässä esiintyy mittaustilavuus V_{ant} ja 1 m^3 tilavuusalkio ΔV sekä yksittäisten sirottajien tutkapoikkipintojen σ_i summa.



Kuva 1: Tutkan mittaustilavuus riippuu etäisyydestä tutkasta. (Wolff, 2019)

Kuvassa 1 on tutkakeila, jossa piirrettyä kaksi mittaustilavuutta V . Mittaustilavuuden leikkauspinta-alalta on ellipsin muotoisen. Ellipsin säteet merkitään x ja y kuvan 1 mukaisesti. Mittaustilavuus määritellään

$$V = \pi x y l = \frac{\pi \theta \phi r^2 \tau c}{8}, \quad (6)$$

jossa θ on antennin atsimuuttisuunnan -3 dB keilanleveys radiaaneina, φ on antennin elevaatiosuunnan -3 dB keilanleveys radiaaneina, r on etäisyys tutkasta (R kuvassa 1), τ on lähetyspulssin kesto, c valon nopeus (c_0 kuvassa 1), $l = \frac{\tau c}{2}$ on mittaustilavuuden pituus, $x = \frac{\theta r}{2}$ ja $y = \frac{\varphi r}{2}$ ovat ellipsin puoliakseleita. Säättökayhtälössä tilavuus V_{ant} on määritelty yhtälön 7 mukaisesti, sillä tutkakeilan teho on jakautunut gaussisesti siten, että sen maksimi sijaitsee keskiakselilla.

$$V_{ant} = V \cdot \frac{1}{2\ln(2)} = \frac{\pi\theta\varphi r^2\tau c}{16\ln(2)} \quad (7)$$

Yhtälössä 5 esiintyvä yksittäisen pyöreän sadepisaran sirontapoikkipinta σ_i Rayleigh-alueella (aallonpituus on selvästi suurempi kuin pisaran halkaisija, $\lambda \gg D$) on

$$\sigma_i = \frac{\pi^5 |K|^2 D_i^6}{\lambda^4}, \quad (8)$$

jossa $|K|$ on veden dielektrisyystekijä, joka riippuu veden suhteellisesta permittiivisyydestä ε_r riippuva kerroin. Permittiivisyys kuvaa sitä, miten väliaine vaikuttaa siihen kohdistuvaan sähkökenttään. Esimerkiksi vedelle $|K|^2$ on 0,93. Jälle, jonka tiheys on 0,176 kg/m³, dielektrisyystekijä on 0,176 (Fabry, 2015, s.34).

$$|K| = \left| \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right| \quad (9)$$

Yhdistämällä yhtälöt 7 – 9 yhtälöön 5 saadaan

$$\sigma = \frac{\pi\theta\varphi r^2\tau c}{16\ln(2)} \cdot \frac{1}{\Delta V} \sum_i^n \frac{\pi^5 |K|^2 D_i^6}{\lambda^4} = \frac{\theta\varphi r^2\tau c\pi^6 |K|^2 Z}{16\ln(2)\lambda^4} \quad (10)$$

jossa tutkaheijastuvuustekijä $Z = \frac{1}{\Delta V} \sum_i^n D_i^6$ siis tilavuusalkiossa (1 m³) olevien vesipisaroiden halkaisijoiden kuudensien potenssien summa.

Antennin efektiivinen sieppauspinta-ala on määritelty yhtälön 11 mukaan,

$$A_{eff} = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}, \quad (11)$$

jossa antennin vahvistus vastaanotossa G_r ja aallonpituus λ .

Yhdistämällä yhtälöt 10 ja 11 yhtälöön 4 saadaan tutkayhtälö muotoon

$$P_r = P_t \cdot \frac{G_t}{4\pi r^2} \cdot \frac{\theta\varphi r^2\tau c\pi^6 |K|^2 Z}{16\ln(2)\lambda^4} \cdot \frac{1}{4\pi r^2} \cdot \frac{1}{L_{at}} \cdot \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}, \quad (12)$$

joka supistuu muotoon

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \theta \varphi \tau c \pi^3 |K|^2 Z}{1024 \ln(2) \lambda^2 r^2 L_{at}} = \frac{Z}{C r^2 L_{at}}, \quad (13)$$

josta edelleen voidaan ratkaista tutkaheijastuvuustekijä Z .

$$Z = P_r C L_{at} r^2, \quad (14)$$

jossa vakiota C kutsutaan tutkavakioksi.

Vaisalan säätutkan käyttämä IRIS-ohjelmisto laskee tutkaheijastuvuustekijän yhtälön 15 mukaisesti.

$$Z = Z_0 \left(\frac{P_r - P_n}{P_n} \right) r^2, \quad (15)$$

jossa Z_0 on kohinatasoa vastaava tutkaheijastuvuustekijä yhden kilometrin etäisyydellä tutkan antennista. Kun säätutka mittaa yhden kilometrin päästä tutkaheijastuvuustekijän arvon, joka on alle Z_0 :n arvon, tulos on kohinatason alapuolella eikä sitä voida pitää vertailukelpoisena mittauksena. P_n on tutkan kalibroinnin yhteydessä mitattu kohinataso vastaanottimen ilmaisimella. IRIS määrittelee Z_0 :n

$$Z_0 = C_{iris} I_0, \quad (16)$$

jossa IRIS:n tutkavakio $C_{iris} = C/g_{tx}$, jossa esiintyy tutkan asetuksissa määriteltävä lähetyksen häviö $g_{tx} = 1/L_{tx}$. Tutkan antennin syötössä redusoitu kohinateho I_0 saadaan tutkan kalibroinnista. IRIS-ohjelmistossa $L_{at} = 0,016$ dB/km sisältää vain ilmakehän hapen ja vesihöyryn aiheuttaman kaksisuuntaisen vaimennuksen. Siihen ei sisälly sateen aiheuttamaa vaimennusta. Vaisalan säätutkalla antennin vahvistus $G_t = G_r = G$, sillä kyseessä on monostaattinen tutka, jossa samaa antennia käytetään sekä mikropulssin lähetykseen että vastaanottamiseen. WRM200 säätutkilla antennin vahvistukseen sisältyy antennin kuivan suojakuvun läpäisyvaimennus noin 0,3 dB ja aaltoputkivaimennus noin 0,4 dB.

IRIS-ohjelmistossa signaalin teho vastaanottimella on muotoa

$$P_r = S g_r g_{rx} + P_n, \quad (17)$$

jossa signaalin teho antennin syötössä S , tutkan kalibroinnista saatava vastaanotinketjun kokonaisvahvistus g_r ja tutkan asetuksissa määritettävä tutkan vastaanoton aaltoputkihäviöt antennin suuntakytkimiltä kalibroitipisteeseen suuntakytkimille mitattuna g_{rx} .

Yhdistämällä yhtälöt 15 – 17 saadaan WRM200 säätutkan yhtälö 18 tutkaheijastuvuustekijälle

$$Z = \frac{1024 \ln(2) \lambda^2 r^2 L_{at} S}{P_t G^2 \theta \varphi \tau c \pi^3 |K|^2 g_{tx}}. \quad (18)$$

2.5 Muita tutkasuureita

Tutka on hyvä laite sadealueiden laajuuden ja liikkeiden sekä sateen intensiteetin seurantaan. Tutkaheijastuvuustekijästä Z , joka riippuu vaikutustilavuudessa olevista sirottavista partikkeleista, voidaan johtaa yhtälön 14 mukaisesti sateen intensiteetti R yksikössä mm/h .

Doppler-siirtymässä on kyse aaltoliikkeen taajuudessa tapahtuvasta näennäisestä muutoksesta. Lähestyvän partikkelin sirottaman mikroaaltopulssin taajuus on suurempi kuin lähetetyn mikroaaltopulssin taajuus. Etääntyvän partikkelin sirottaman taajuus on vastaavasti pienempi. Doppler-siirtymän perustella voidaan laskea sirottajan nopeus tutkasäteen suunnassa. Kun mittaus tehdään itään, saadaan sirottavan kohteen länsi-itä suuntainen nopeus. Pienet kevyet partikkelit liikkuvat tuulen mukana, ja doppler-mittauksista voidaan arvioida tuulen suunta ja voimakkuus ympäröivässä ilmassa. Kiinteillä esteillä, kuten mastoilla nopeus on lähellä nollaa, jolloin ne on helppo siivota pois tutkakuvasta. Suoraan ylös suunnattu tutka havaitsee hydrometeorien putoamisnopeuden sekä ilman pystynopeuden.

Kaksoispolarisaatiosuureita voidaan laskea, kun käytetään vaaka- ja pystysuuntaan polarisoituja signaaleja. Vaakasuuntaan polarisoitu mikroaaltopulssi koostuu aallosta, jonka sähkökenttä osoittaa vaakasuuntaan, ja sen sironneen pulssin teho riippuu sirottajan vaakasuuntaisesta halkaisijasta. Putoamisliikkeessä vesipisaroista suurimmat litistyvät navoiltaan eniten. Litistyneiden sadepisaroiden vaakasuuntainen halkaisija on pystysuuntaista halkaisijaa leveämpi. Tutkaheijastuvuustekijän Z mittauksissa käytetäänkin tätä vaakasuuntaan polarisoitua pulssia, sillä siitä saadaan voimakkaampia kaikuja. Tämän takia Z on monessa kirjallisuudessa merkitty ZH . Differentiaali tutkaheijastuvuustekijä ZDR (engl. sanoista differential reflectivity) on määritelmänsä (yhtälö 19) mukaan vaakasuuntaan ja pystysuuntaan polarisoitujen tutkaheijastuvuustekijöiden eroavaisuuksia kuvaava suure.

$$ZDR = \frac{ZH}{ZV} \quad (19)$$

Se on hyvä suure kuvaamaan sadepisaran muotoa ja edelleen keskimääräistä pisarakokoa. Suuri ZDR :n arvo kertoo leveistä pisaroista. Myös ZDR esitetään yleensä

desibeliasteikolla. Pienille lähes pyöreille pisaroille ZDR :n arvo on lähellä nollaa. Suurille navoiltaan litistyneille konvektiivisen sateen pisaroille arvo voi olla 1 – 4 dB.

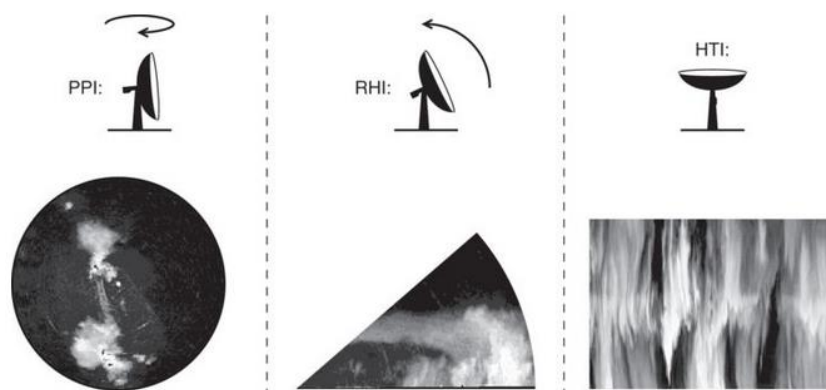
Kaksoispolarisaatiosuureista saadaan tietoa sadepartikkelien vaaka- ja pystysuuntaisista halkaisijoista ja edelleen niiden muodosta ja koosta. Kaksoispolarisaatiosuureiden perusteella havaitut kohteet voidaan määritellä lumi-, vesi- tai räntäsateeksi, rakeiksi tai ei-meteorologiseksi kohteiksi kuten linnuiksi ja hyönteisiksi. WRM200:lla luokittelun hoitaa reaaliaikaisesti HydroClass-ohjelmisto, joka käyttää polarisaatiomittauksia ja sumeaa logiikkaan perustuvaa algoritmia (Vaisala, 2013).

2.6 Säätutkatuotteet

Säätutka kerää dataa eri korkeuskulmilla ympäriltään 360°. Yhden korkeuskulman mittausta kutsutaan nimellä PPI (engl. sanoista plan position indicator). Siinä mittaukset on esitetty yhdeltä korkeuskulmalta mitattuna atsimuuttikulman ja etäisyyden funktiona. PPI mitataan useilla korkeuskulmilla, ja näistä muodostetaan yhteiskuva vakiokorkeudelta eli CAPPI (engl. sanoista constant altitude PPI). Se voidaan muodostaa esimerkiksi kolmen kilometrin korkeudelta maan pinnasta (Fabry, 2015, s. 38).

Jos mittaus tehdään yhteen tiettyyn atsimuuttikulmaan eri korkeuskulmilla, saadaan mittaukset korkeuskulman ja etäisyyden suhteen. Tämä tuote, RHI (engl. sanoista range height indicator), esittää vertikaalia poikkileikkausta valitusta suunnasta tutkan sivulta.

Jos tutka asetetaan mittaamaan vain yläpuoleltaan ajan funktiona, saadaan mitattua HTI (engl. sanoista height time indicator). Esimerkit säätutkatuotteista ovat esitettynä kuvassa 2.



Kuva 2: Säätutkatuotteet PPI, RHI ja HTI (Fabry, 2015, s.30)

2.7 Sääatutkan huolto ja kalibrointi

Mittalaitteiden kalibrointi on välttämätöntä, jotta laitteen mittauksia voidaan pitää luotettavina. Kalibroinnilla tarkoitetaan mittalaitteen vertaamista mittanormaaliin, minkä tuloksena annetaan mittalaitteen näyttämä virhe.

Posion (2014) mukaan uuden WRM200 sääatutkan käyttöönoton yhteydessä sille tehdään sekä valmistajan että tilaajan määritellyt testit. Hyväksytyjen testien jälkeen sääatutka otetaan operationaaliseen testiin kuukauden ajaksi. Jos testin aikana sääatutkan toiminta on moitteetonta, se otetaan operationaaliseen käyttöön.

Operationaalisessa käytössä olevalle sääatutkalle tehdään määräaikaishuoltoja vuosittain. Vuosihuolto suoritetaan tehtävälisan mukaan siten, että sääatutkan osat tulee käytyä järjestelmällisesti läpi. Näin huomataan mahdolliset halkeamat, liat sekä osien löystymiset ja rikkoontumiset. Lisäksi sääatutkalle suoritetaan liukupintojen puhdistus ja rasvaus kolmen vuoden välein. Valmistajan suosituksen mukaan vuosihuollon yhteydessä suoritetaan kuluvien osien vaihtoa viiden vuoden välein. Kokonaisuudessaan sääatutkan elinikä on arvioitu olevan 15 vuotta.

Aina huoltotoimenpiteiden jälkeen tehdään sääatutkan kalibrointi. Ilman kalibrointia mittauksista voi tulla virheellisiä, sillä pienetkin muutokset sääatutkan osissa vaikuttavat mittauksiin. Ryzhkov et al. (2005) asettavat virherajoiksi tutkaheijastuvuustekijälle Z 1.0 dB tai differentiaalisen tutkaheijastuvuudelle ZDR 0.1 - 0.2 dB. Myös Frech et al. (2017) asettavat virherajoiksi 1 dB Z :lle ja 0.1 dB ZDR :lle.

Tutkien on oltava vertailukelpoisia keskenään. Monen sääatutkan yhdistäminen yhteiseen tutkaverkkoon mahdollistaa suuremman mittaskaalan sääsystemin kuten keskileveysasteiden matalapaineen säärintamien havainnoinnin. Ruotsin ja Suomen tutkien kalibroinnissa huomattiin 1990-luvulla merkittäviä puutteita (Saltikoff et al., 2010), jotka korjattiin NORDRAD (engl. sanoista Nordic Weather Radar Network) yhteistyössä pohjoismaiden ilmatieteen laitosten kesken. Nykyään yhteistyötä tehdään pohjoismaiden ja Baltian maiden kesken EU:n BALTRAD-projektissa sekä eurooppalaisten ilmatieteen laitosten yhteistoimintaelimen EUMETNET (engl. sanoista Network of European Meteorological Services) sisällä projektissa OPERA (engl. sanoista Operational Program on the Exchange of Weather Radar Information). OPERA:n tavoite on kehittää ja tuottaa korkealaatuisia sääatutkatuotteita operatiivisesti Euroopan laajuisesti.

Sääatutkan kalibroimiseen ei ole olemassa yksinkertaista ja ongelmattonta menetelmää. Meischnerin kirjassa (2004) kerrotaan, että sääatutkan antennin vahvistus tai keilan

leveys ei yleensä vaadi kalibrointia, mutta elektroniset komponentit kuten vastaanotin voi menettää tarkkuuttaan virhettä aiheuttavan ryöminnän seurauksena. Säättukan suojakupu, joka altistuu jatkuvasti säälle, voi ikääntyessään muuttua ominaisuuksiltaan ja vaikuttavuudeltaan erilaiseksi. Myös tutkan suuntaus vaatii kalibrointia.

Kalibroinnin voi tehdä hyödyntämällä ulkoista laitetta, joka aluksi vastaanottaa ja mittaa säättukan lähettämän signaalin. Ulkoiselta laitteelta voidaan lähettää säättukalle kalibroitu, teholtaan tunnettu signaali. Menetelmän avulla saadaan kalibroitua sekä säättukan lähetin että sen vastaanotin. Menetelmää voidaan soveltaa sateen aiheuttaman vaimennuksen selvittämiseen. Kirkkaan ilman aikana tehtyä mittausta voidaan verrata sadetilanteessa tehtyyn mittaukseen, jolloin voidaan arvioida sateen ja määrän suojakuvun aiheuttama signaalin vaimennus. Sade voi vaihdella intensiteetiltään ja voi toisaalta olla hyvin paikallista tai laaja-alaista. Suojakupua voi peittää hyvin ohut tai sitten paksumpi kerros vettä. Siispä kirkkaan ilman ja sadetilanteessa tehdyn mittauksen pohjalta ei voida määritellä kaikissa sadetilanteissa pätevää vaimennuskerrointa. Vaimennuksen määrä vaihtelee sateen intensiteetin ja paikallisuuden mukaan.

Jos lähetintä ei tarvitse kalibroida, vastaanottimen kalibroinnin voi suorittaa jonkun ulkoisen signaalin avulla. Yksi mahdollisuus on hyödyntää auringon säteilyä (Huuskonen et al., 2016). Tutka osoittaa operatiivisen mittauksen aikana usein sopivasti auringon suuntaan. Koska Aurinko on hidasliikkeinen ja sen säteilyspektri tunnetaan, voidaan tietoa hyödyntää säättukan kalibroimiseksi. Aurinkomittaukset voivat olla yhdelle tutkalle mahdollisia jopa 30 kertaa päivässä (Frech et al., 2017). Lisäksi Aurinko näkyy samanaikaisesti useille tutkille. Tämä tietysti vaatii leveysastetta ja vuodenaikaa, jolloin aurinko nousee horisontin yläpuolelle. Aurinkomittauksella voidaan vastaanottimen lisäksi kalibroida säättukan suuntaus eli antennin atsimuutti- ja korkeuskulma.

Toinen vaihtoehto vastaanottimen kalibrointiin on käyttää heijastavaa kappaletta, jonka sirontapoikkipinta tunnetaan. Pallokalibrointimenetelmässä metallipallo, jonka halkaisija tunnetaan, nostetaan ilmapallon tai leijan avulla ilmaan. Pallon heijastamaa signaali voidaan selvittää laskennallisesti. Laskettua tulosta voidaan verrata mitattuun tulokseen, jolloin saadaan selville lasketun ja mitatun arvon ero. Menetelmä on hyvin herkkä. Se vaatii mittausasettelun tarkkaa geometrista toteuttamista. Jos pallo liikkuu tai mittauksen aikana ilmassa on samanaikaisesti mitään muita sirottajia, kuten sadepisaroihin tai hyönteisiin, tulos menettää tarkkuutta merkittävästi.

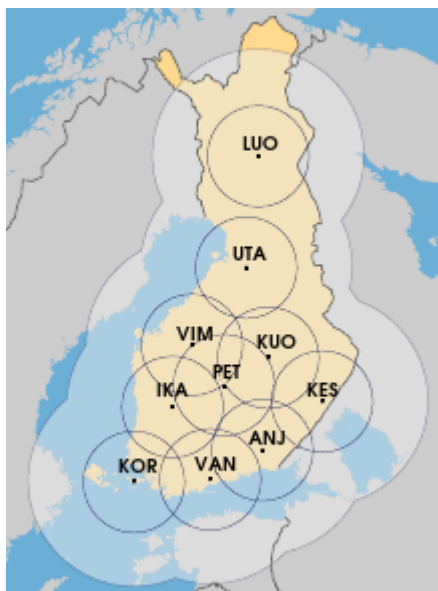
Lisäksi säätutkan suuntauksen kalibroimiseen voidaan käyttää myös esimerkiksi säätutkan lähialueella olevien tarkasti tunnettuja mastojen tutkakaikuja. Yleensä säätutkat pyritään kuitenkin sijoittamaan kohteisiin, joiden ympäristössä ei ole esteitä haittaamassa näkyvyyttä.

Säätutkan mittauksien validointia tehdään myös käyttämällä in situ -sademittareita vertailukohtana säätutkan sademääräarvioihin (Holleman et al., 2010 ja Frech et al., 2013). Validoinnilla tarkoitetaan mittausmenetelmän suorituskyvyn sekä sen soveltuvuuden arviointia aiottuun käyttötarkoitukseen. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, voidaanko säätutkan vertailukohtana käyttää sademittarin sijasta pienoissadetutkaa. Pienoissadetutkan käyttöä säätutkan mittausten validoimisessa sademittarin sijasta puoltaa se, että molemmat tutkat mittaavat tutkaheijastuvuustekijää.

3. LAITTEET

3.1 Säätutkaverkko Suomessa

Ilmatieteen laitoksella on operatiivisessa käytössä kymmenen Vaisala Oyj:n valmistamaa säätutkaa, joiden sijainnit ovat kartalla kuvassa 3. Kaikki tutkat on päivitetty vuosien 2009 - 2017 aikana uudempiin kaksoispolarisaatiotekniikkaa hyödyntäviin tutkiin.



Kuva 3: Tutkaverkko Suomessa 2015 (Ilmatieteen laitos)

Kuvassa on esitetty tutkien kattama alue. Kesäaikaan tutka havaitsee sateet noin 250 km etäisyydeltä (vaaleat alueet) ja talviaikaan noin 120 km etäisyydeltä (mustat ympyrät). Etäisyydet perustuvat oletukseen, että kesällä sade muodostuu korkeista pilvimuodostelmista ja pilven alarajan korkeuskin on talven vastaavaa korkeampi.

Rajakerroksen korkeus on kesällä korkeampi kuin talvella. Talvella sadetta voit tulla hyvinkin matalasta pilvestä. Kun ollaan 120 km etäisyydellä tutkasta, tutka ei havaitse alle kahden kilometrin korkeudelta sadetta tutkasäteiden etenemisen luonteen vuoksi. (Ilmatieteen laitos).

Taulukko 2: Ilmatieteen laitoksen säätutkat lyhenteineen (Ilmatieteen laitos)

Paikkakunta	Lyhenne	Perustamisvuosi	Korkeus merenpinnasta (m)
Korppoo	KOR	1997	61
Vantaa	VAN	1994	82
Anjalankoski	ANJ	1995	139
Ikaalinen	IKA	1994	153
Petäjävesi	PET	2015	271
Kesälahti	KES	2014	174
Vimpeli	VIM	2005	200
Kuopio	KUO	1995	268
Utajärvi	UTA	1997	118
Luosto	LUO	2000	533

Yksittäinen säätutka ei riitä kuvaamaan synoptisen skaalan sääilmiöitä, kuten matalapaineita ja niihin liittyviä rintamia. Yhdistämällä monta säätutkaa, saadaan laajan skaalan kuva säästä. Säätutkaverkon ehdottomasti paras ominaisuus on huomattava datamäärä, jota se kerää hyvällä aika- ja paikkaresoluutiolla ympäri vuorokauden. Suomen säätutkaverkon kattava alueella oli vuonna 2014 noin 1,6 miljoonaa pikseliä (Ilmatieteen laitos). Pikseleillä tarkoitetaan tässä yhteydessä kuvassa 22 erottuvia erivärisiä suorakulmion muotoisia alueita. Pikselien määrä kasvaa uusien säätutkien myötä. Ilmatieteen laitoksella on toiminnassa noin 180 sademittaria. Kun verrataan sademittarien keräämää kokonaisuainestoa säätutkaverkon keräämään datamäärään, on säätutkaverkon keräämää dataa merkittävästi enemmän. Säätutkien avulla on helpompi muodostaa kokonaiskuva sateen intensiteetistä ja liikkeistä.

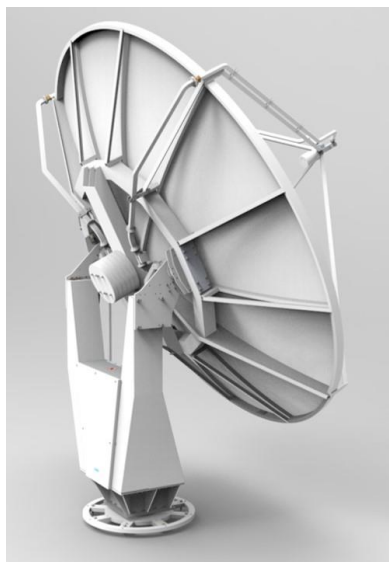
Yksi tämän tutkielman tavoitteista on antaa hyödyllistä tietoa säätutkaverkon ylläpidolle ja suunnittelijoille mahdollisesta uudesta kalibrointimenetelmästä. Kuten edellä lueteltiin, olemassa on useita säätutkien kalibrointimenetelmiä, mutta absoluuttisen kalibrointitekniikan kehittäminen on haastavaa. Tutkimuksessa halutaan ottaa selvää, voidaanko säätutkan kalibrointi tehdä käyttäen MRR-2 pienoissadetutkaa vertailututkana.

Säätutkaverkon huollosta, suunnittelusta, asentamisesta ja kehittämisestä vastaa Ilmatieteen laitoksen Havainto-yksikkö. Säätutkaverkon ylläpito ja kehittäminen ovat jatkuvaa työtä, ja seuraavan säätutka pystytetään Pohjois-Karjalaan, Nurmekseen, kesällä 2019. Nurmeksen säätutkasta tulee Ilmatieteen laitoksen yhdestoista säätutka, joka tarkentaa tutkakuvaa Itä-Suomen osalta.

3.2 Vaisala WRM200 säätutka Ikaalisissa

Ikaalisten säätutka on yksi Ilmatieteen laitoksen operatiivisessa käytössä olevista kaksoispolarisaatiotutkista. Se sijaitsee Pirkanmaalla Ikaalisten Hakumäellä koordinaateissa 61.77N° 23.08E° 153 m korkeudella merenpinnan tasosta. Ikaalisissa on toiminut säätutka jo vuodesta 1994 lähtien (Ilmatieteen laitos).

WRM200 toimii taajuusalueella C, 5,5 – 5,7 GHz. Ikaalisten säätutkassa on käytössä lähetystaajuus 5,6 GHz. Sen aallonpituus on 5,310 cm, joten se toimii Rayleigh-sironnan alueella. WRM200 säätutkan piikkiteho on Vaisalan tietojen mukaan 250 kW, mutta Ikaalisten tutkan piikkiteho on 219 kW. WRM200 on pulssitutka, jonka pulssintoistotaajuus on säädettävissä 200 – 2400 Hz välillä. Ikaalisten tutka käyttää pulssintoistotaajuutta 570 ja 900 Hz riippuen korkeuskulmasta. (Ilmatieteen laitos, Vaisala, 2013)



Kuva 4: WRM200 (Vaisala Oyj)

Ikaalisten WRM200 tehtävälistalla on sekä PPI- että RHI-mittauksia. Sen käytössä on 15 eri korkeuskulmaa 0,3° - 45° väliltä, joilta se mittaa PPI tutkatuotteita. Korkeuskulmilta 0,3°, 0,4°, 0,7°, 1,5°, 2,0°, 3,0°, 5,0° ja 9,0° PPI tuotetaan viiden minuutin välein. Lisäksi PPI mitataan korkeuskulmilta 0,5°, 4,0°, 7,0°, 11,0°, 15,0°, 25,0° ja 45,0°. Yhdistelmäkuva CAPPI tuotetaan kerran 15:sta minuutissa. Lisäksi se tuottaa yhden RHI tutkatuotteen

Hyytiälän suuntaan (atsimuuttikulma $81,9^\circ$) joka 15 minuutti. Ikaalisten WRM200 käyttää kahta pulssinpituuksia $1,96 \mu\text{s}$ ja $0,8 \mu\text{s}$.

3.3 Metek MRR-2 pienoissadetutka Hyytiälässä

Hyytiälän tutkimusasemalla ($61,84^\circ\text{N}$, $24,29^\circ\text{E}$) on Helsingin yliopiston tutkimuskäytössä saksalaisen Metekin (Meteorologische Messtechnik GmbH) valmistama kuvan 5 mukainen MRR-2 pienoissadetutka.



Kuva 5: MRR-2 (Metek)

MRR-2 on kevytrakenteinen pienoistutka, joka on pienen kokonsa ansiosta helppokäyttöinen ja mahdollista siirtää paikasta toiseen. Sen antennin halkaisija on vain 60 cm ja antennin ja jalustan yhteispaino 6 kg. Se on valmistajansa Metekin mukaan helppo asentaa ja suhteellisen halpa käytössä.

MRR-2 ei lähetä aaltoja pulsseina vaan se on jatkuvan aallon taajuusmodulointitutka, FMCW (engl. sanoista frequency modulated continuous wave). MRR-2 toimii taajuusalueella K taajuudella 24 GHz. Sen aallonpituus on 1,24 cm. Yksinkertaisen rakenteen ansiosta MRR-2 tarvitsee vain noin 25 W energiaa sekä lisäenergiaa, jos antenniin on asennettu lämmitin. Sen lähetysteho on pieni, vain 50 mW. (Metek)

MRR-2:sta löytyy säädettävä paikka- ja aikaresoluutio. Hyytiälässä vuosina 2015-2017 paikkaresoluutio oli valittuna 60 metriin. Vuonna 2018 se oli säädetty 35 metriin. Sääto on mahdollista tehdä 10 -200 m välillä. MRR-2:n tutkakeilan mittausalue on jaettu 32 osaan. Käytettäessä 60 metrin paikkaresoluutiota tämä tarkoittaa mittauksia $32 \cdot 60 \text{ m} = 1920 \text{ m}$ korkeuteen. 200 metrin säädöllä olisi mahdollista yltää $32 \cdot 200 \text{ m} \approx 6 \text{ km}$ korkeuteen. MRR-2: lähettää jatkuvaa aaltoa ja se tallentaa arvoja sekunnin välein. Näistä arvoista se laskee aikakeskiarvoja. Aikakeskiarvoitus on mahdollista tehdä 10 – 3600 sekunnin jaksoissa. (Metek)

MRR-2:n tutkakeila on suunnattu suoraan ylöspäin. Se mittaa yläpuoleltaan pisarakokojakaumaa DSD (engl. sanoista drop size distribution), ja laskee sen perustella vesipitoisuuden LWC (engl. sanoista liquid water content), sademäärään R , tutkaheijastuvuustekijän Z ja doppler-nopeuden $v(D)$.

MRR-2:n käyttämä aallonpituus on vain 1,24 cm, joten Rayleigh-oletus, jossa pisan halkaisija D on paljon pienempi aallonpituutta λ , ei ole voimassa. Siksi tutkaheijastuvuustekijää ei voida laskea suoraan vastaanotetun signaalin tehosta vaan on MRR-2:lla laskettu suoraan pisarakokojakaumasta yhtälön 12 mukaan. Vesipitoisuus (g/m^3) on verrannollinen pisaroiden tilavuuteen ja veden tiheyteen yhtälön 20 mukaan.

$$LWC = \rho_w \frac{\pi}{6} \int_0^\infty N(D) D^3 dD, \quad (20)$$

jossa ρ_w on veden tiheys. Koska MRR-2 on suunnattu suoraan ylöspäin, voidaan tehdä oletus, että mitattu Doppler-nopeus on suoraan pisaroiden putoamisnopeus $v(D)$ yksikössä m/s, joka riippuu aina pisaroiden koosta. Isommat pisarat putoavat nopeammin kuin pienet. Sateen intensiteetti (mm/h) riippuu pisarakokojakaumasta ja pisaroiden putoamisnopeudesta yhtälön 21 mukaisesti.

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^\infty N(D) D^3 v(D) dD \quad (21)$$

Metekin mukaan mittauksiin ei aiheudu häiriötä tuulesta, ympäröivistä maaston muodoista tai merestä nousevista pärskeistä tai merisuolasta. Sen mukaan MRR-2 soveltuu talviolosuhteisiin, koska sen suojakupu lämpenee automaattisesti tarvittaessa. Helppokäyttöisyytensä vuoksi se sopii käytettäväksi syrjäseuduillakin. Alkujaan MRR-2 on kehitetty poijuille Pohjanmerelle vesisateiden tutkimiseen. Sitä käytetään myös sateen reaaliaikaiseen seurantaan, säätutkien kalibrointiin ja sulamiskerroksen tarkkailuun. Sulamiskerros on kerros, jonka yläpuolella vesi esiintyy jääkiteinä ja alapuolella nestemäisenä vetenä. Sulamiskerroksessa jääkiteet alkavat sulaa ja takertuvat toisiinsa. Sulamiskerros sirottaa voimakkaasti tutkan lähettämää säteilyä. Alue, jolla tutkasäde läpäisee sulamiskerroksen, havaitaan tutkakuvassa voimakas tutkaheijastuvuustekijä. (Metek)

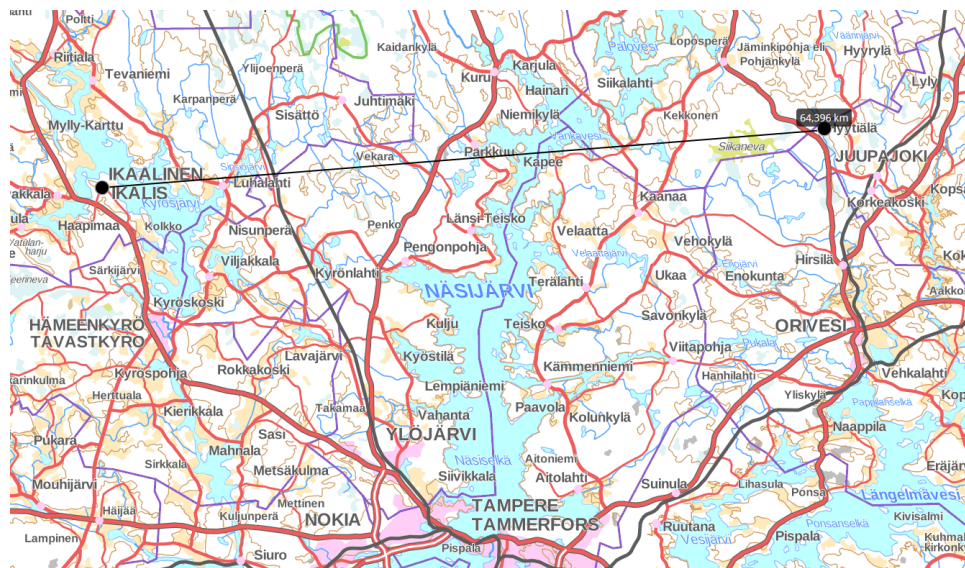
Taulukko 3: Tekniset tiedot Ikaalisten WRM200 ja Hyytiälän MRR-2 tutkista

Parametri	WRM200	MRR-2
taajuus	5,6 GHz	24,23 GHz
aallonpituus	5,310 cm	1,238 cm
keilan leveys	0,97°	1,50°
lähetysteho	300 W	50 mW
pulssintoistotaajuus	570 Hz, 900 Hz	-
näytteenottotaajuus	-	125 kHz
antennin leveys	4,5 m	0,06 m
antennin ja jalustan paino	1530 kg	6 kg
korkeus meren pinnasta	153 m	146 m
sijainti (lat, lon)	61,7673N 23,0764E	61,8435N 24,2881E
aikaresoluutio	0,3° PPI: 5 min	AVE-data: 1min
paikkaresoluutio	500 m	35 - 60 m
tutkatuotteet	PPI, RHI	HTI
korkeuskulmat	0.3°, 0.7°, 1.5°, 2.0°, 3.0°, 5.0°, 7.0°, 9.0°, 11.0°, 15.0°, 25.0°, 45.0°	90°

4. MENTELMÄT JA DATA

4.1 Vertailun asettelu

WRM200 sijaitsee Ikaalisten keskustassa vesitornin päällä korkeudella 153 m merenpinnan tasosta. MRR-2 sijaitsee Hyytiälän metsäasemalla Juupajoella. WRM200 ja MRR-2 ovat noin 64,4 kilometrin etäisyydellä toisistaan (Kuva 6). Tutkien väliin jää Kyrösjärvi, maaseutua, metsää, Näsijärven vesistöä ja Siikannevan suo.



Kuva 6: Etäisyys Ikaalisista Hyvitiälään on linnuntietä noin 64,4 km. Välimaastossa vesistöjä, maaseutua, metsä- ja suoalueita (Paikkatietoikkuna).

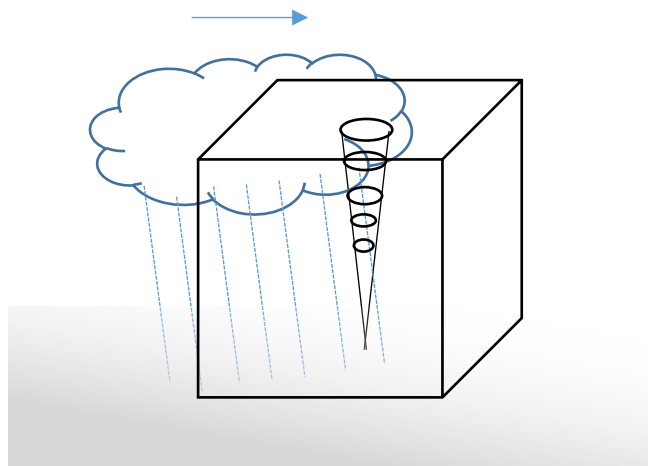
Tällä etäisyydellä tutkakeilan taittuminen on sen verran vähäistä, että sitä ei tarvitse ottaa huomioon.

Tutkimukseen on haluttu valita sadetilanteita, joissa sade olisi mahdollisimman homogeenista. Ikaalisen tutkan korkeuskulman $0,3^\circ$ PPI-mittauksen valitut pikselit Hyvitiälässä vastaa vaikutustilavuutta, joka yltää maan pinnasta noin yhden kilometrin korkeuteen. Kesäaikaan pinnan ja yhden kilometrin korkeuden välillä pisarakoossa ei tapahdu merkittävää muutosta. Vertailuasetteluun on otettu vain kesällä esiintyviä sateita. Valinnan myötä oletetaan, että pintalämpötila on vähintään $15,5^\circ\text{C}$ ja yhden kilometrin korkeudella ei esiinny sulamiskerrosefektia, mikä yksinkertaistaa vertailuasettelua.

Säätutkan WRM200 vaikutustilavuus määritellään seuraavasti. PPI-datasta valitaan kaksi pikseliä MRR-2:n yläpuolelta. MRR-2 sijoittuu melko tarkasti näiden kahden pikselin väliselle rajalle. Säätutkan tutkakeilan leveys on $0,97$ astetta ja etäisyydellä 65 km tutkakeila on levinnyt noin 1 km leveydelle. Tämä saadaan laskemalla piirin pituus sektorista, jonka keskuskulma on $0,97$ astetta. Yhden pikselin tutkakeilan suuntainen sivu on 500 m. Kun otetaan tutkakeilan suuntaan kahden peräkkäin olevan pikselin yhteistilavuus, saadaan näillä mitoilla noin yhden kuutiokilometrin vaikutustilavuus. Tutka ilmoittaa kutakin pikseliä vastaavan tutkaheijastuvuustekijän Z . Laskemalla valittujen kahden pikselin tutkaheijastuvuuksien keskiarvo saadaan lukuarvo Z_{WRM200} .

Pienoissadetutkan MRR-2 tutkakeilan leveys on $1,5$ astetta. Tutkakeila levenee noin yhden kilometrin korkeuteen mennessä niin, että sen piirin leveys kasvaa noin 25

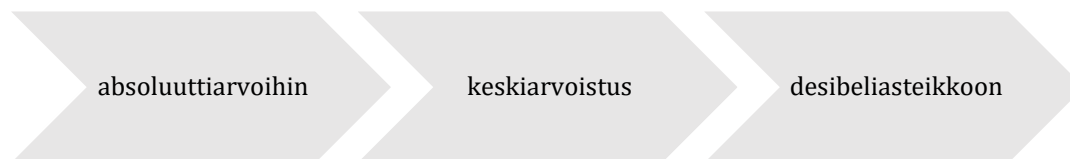
metriin. Ikaalisen tutkan vaikutustilavuus on noin kuutiokilometrin. Hyytiälän MRR-2:n vaikutustilavuus on sen mittauskorkeudesta riippuen $100\text{ m}^3 - 30\,000\text{ m}^3$. Hyytiälän pianoissadetutkan vaikutustilavuus on siis monta kertaluokkaa Ikaalisten tutkan vaikutustilavuutta ($1\text{ km}^3 = 1\,000\,000\,000\text{ m}^3$) pienempi (kuva 7).



Kuva 7: Ikaalisten tutkan WRM200 vaikutustilavuus kattaa kaksi pikseliä MRR-2:n yläpuolelta (1 km^3 musta kuutio), jonka sisällä MRR-2:n keilamainen vaikutustilavuus (musta kartio). Vaikutustilavuuksien yli kulkee sadealue noin 1 km/min nopeudella.

WRM200 skannaa ympäristöään jatkuvasti suorittaen PPI-mittauksen eri korkeuskulmilla. Alimman korkeuskulman ($0,3^\circ$) arvot saadaan joka viides minuutti. MRR-2 suorittaa mittauksia sekunnin välein. Näistä arvoista voidaan laskea minuutin keskiarvoja ja edelleen näistä valita joka viides minuutti minuutin keskiarvo.

Jotta WRM200 ja MRR-2 tutkien mittaamia tutkaheijastuvuustekijän arvoja näissä vaikutustilavuuksissa voidaan verrata toisiinsa, on tehtävä muutamia keskiarvoituksia. MRR-2 mittaamat tutkaheijastuvuustekijöistä otetaan keskiarvo koko mitattavan ilmapatsaan yli eli pinnasta korkeudelle 1 km asti. Kun lasketaan desibeliarvoista keskiarvoja, on desibeleinä ilmoitetut arvot (dBZ) muutettava ensin absoluuttisiin arvoihin (mm^6/m^3). Absoluuttisilla arvoilla voidaan laskea mitatut arvot eri korkeuksilta yhteen ja jaettu summa arvojen kokonaismäärällä saaden keskiarvo. Lopuksi absoluuttinen arvo on muunnettu takaisin desibeliasteikolle. Keskiarvoistusprosessia kuvaava järjestys on esitettyinä skemaattisesti kuvassa 8.



Kuva 8: Tutkaheijastuvuustekijä on muutettava desibeli-asteikolta absoluuttiarvoon keskiarvon laskemista varten.

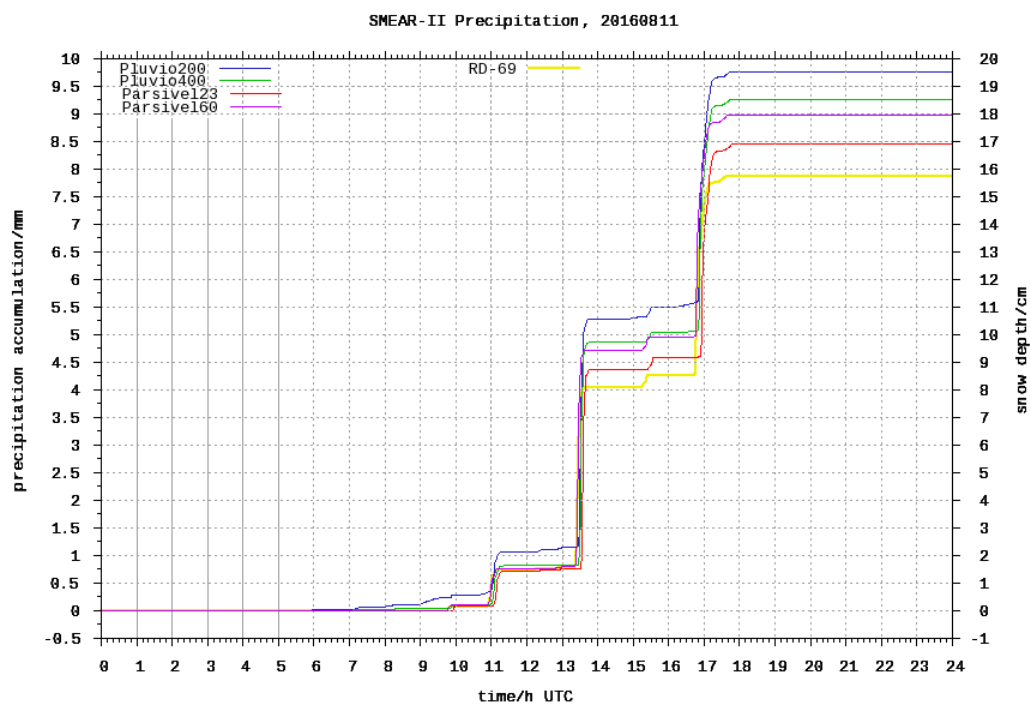
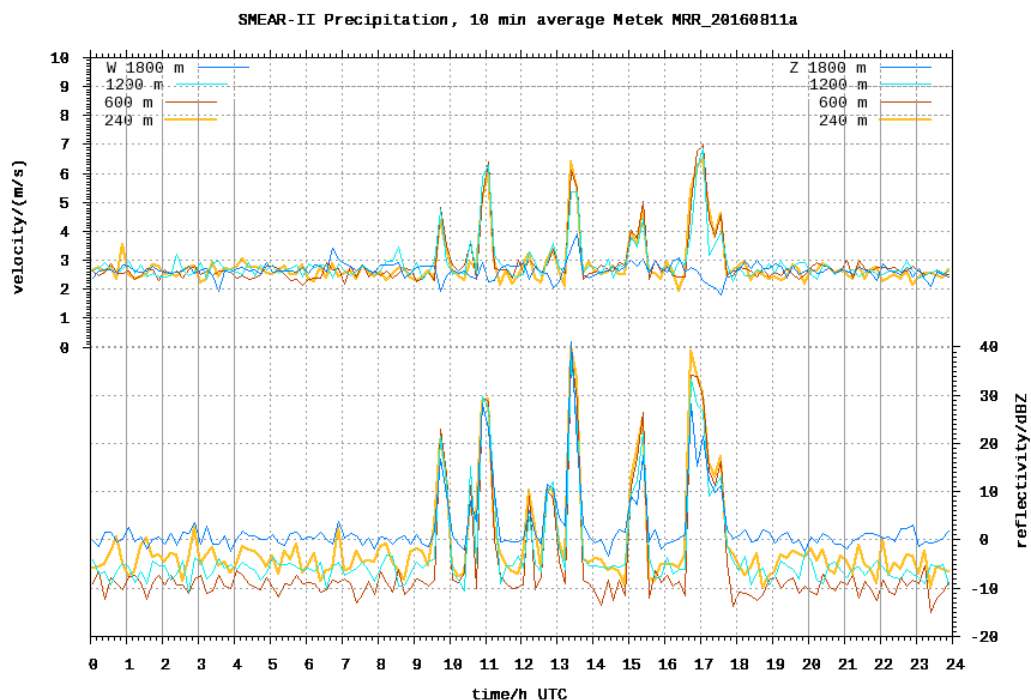
Toisaalta MRR-2 keilan tilavuus ei yksinään ole vielä verrattavissa kokonaisen kuutiokilometrin tilavuuteen. Oletetaan, että sadealue liikkuu Hyytiälän yli noin 60 km/h eli noin 1 km/min (kuva 7). Laskemalla minuutin keskiarvo MRR-2 tutkakeilan yli keskiarvotetuista arvoista saadaan lukuarvo Z_{MRR-2} . Se sisältää siis keskiarvotuksen pinnalta määrätylle korkeudelle sekä minuutin aikakeskiarvotuksen. Vertailussa käytetään Z_{WRM200} ja Z_{MRR-2} arvoja joka viides minuutti.

Mittausresoluutioiden erojen takia vertailuun halutaan valita tasaista kesäsadetta. Tasaisella sateella pisarakokojakauma on homogeeninen ja sade on tasaisesti levittäytynyt koko mittausalueelle. Siksi on odotettavissa, että tasaisessa sateessa vertailussa laskettavat lukuarvot Z_{WRM200} ja Z_{MRR-2} vastaavat likimain toisiaan.

Konvektiivisessa sateessa sade on kuuroluonteista. Sateen intensiteetin muutokset ovat ajallisesti ja paikallisesti nopeampia. Konvektiivisissa sateissa WRM200:n vaikutustilavuuden alueella voi esiintyä vain paikoin sadetta, mikä pienentää Z_{WRM200} :n arvoa. Sade voi kuitenkin osua MRR-2:n tutkakeilaan kasvattaen Z_{MRR-2} arvoa. Toisaalta kuuro voi olla osumatta MRR-2:n tutkakeilaan, jolloin Z_{MRR-2} arvo jää hyvin pieneksi. Tämä tulee näkymään konvektiivisien päivien vertailuissa suurempana tutkaheijastuvuuksien Z_{WRM200} ja Z_{MRR-2} erona.

4.2 Vertailuun valitut sadetapaukset

Tarkasteluun on otettu kesäsadepäiviä vuosilta 2015-2018. Kesäaika on rajattu kattamaan päivät kesäkuun alusta elokuun loppuun. Tutkimukseen valitut kuukaudet on käyty läpi päivä kerrallaan. Päivät on lajiteltu MRR-2:lla ja optisella parsivel-sademittarilla kerätyn datan perusteella tasaisen ja konvektiivisen sateen päiviin. Valmiit kuvaajat (kuten kuva 9) MRR-2:n mittaamasta tutkaheijastuvuustekijästä ja putoamisnopeudesta sekä parivelin mittaamasta sadekertymästä on löydettävissä Leskisen ylläpitämältä nettisivulta.



Kuva 9: Yläkuvassa MRR-2:n mittaama pisaroiden putoamisnopeus W (m/s) ja Tutkaheijastuvuustekijä Z korkeuksilla 240 m (keltainen), 600m (punainen), 1200 m (vaalean sininen) ja 1800 m (tumman sininen) ajan (UTC) funktiona. Alakuvassa optisten sademittarien mittaama sadekertymä ajan funktiona. (Leskinen, 2019)

Koko ajalta on analysoitu yhteensä 43 päivää, joista tasaista sadetta esiintyy 21 päivänä, konvektiivista sadetta 20 päivänä, ja kahtena päivänä esiintyy selvästi sekä tasaista että

konvektiivista sadetta. Vertailussa mukana olevat päivät on merkitty sinisellä värillä taulukossa 4, joka on piirretty MRR-2:n laatutarkkailua varten. Tasaista sadetta analyysissä on luokittelun mukaan noin 150 tuntia.

Tasaisen sateen päivänä on yksi tai useampi useamman tunnin mittainen sadejakso. Tasaisen sateen ryhmässä on joitakin lämpimän rintaman sateita ja useita jo oklutoituneita rintamia.

Tilanteet, joissa sateen intensiteetti vaihtelee jyrkästi, on luokiteltu konvektiivisen sateen ryhmään. Konvektiivisen päivälle ominaista on lyhyet alle tunnin kestävät kuurosateet. Konvektiivisen sateen ryhmä sisältää kylmien rintamien ylityksiin liittyvää sadetta ja epävakasta kuuroherkkää sadetta rintama ylitysten jälkipuoliskolla.

Sadetta esiintyy runsaasti rintamien yhteydessä. Rintamassa kaksi ominaisuuksiltaan erilaista ilmamassaa kohtaa toisensa. Otollisin tilanne tasaisen sateen syntyyn esiintyy lämpimän rintaman yhteydessä. Lämpimän rintaman yhteydessä lämmin ja kostea ilma nousee kylmän ja kuivan ilman päälle. Lämpimän rintaman liikenopeus on 20-60 km tunnissa ja se ylittää havaintoaseman tyypillisesti 8-30 tunnin kuluessa (Karttunen et al., 2008). Rintaman lähestyessä pilvet paksunevat ylhäältä alaspäin alkaen yläpilvistä (Ci, cirrus ja CS, cirrostratus) muuttuen keskipilviksi (As, altostratus ja Ac, altocumulus) ja lopulta aidoksi sadepilveksi (Ns, nimbostratus) ja alapilviksi (Sc, stratocumulus ja St, stratus). Kesätapauksissa sää usein selkenee pian rintaman takana. Sekä keskipilvet, että aito sadepilvi satavat, mutta keskipilvistä satavat pisarat ehtivät haihtua kylmässä ja kuivassa ilmamassassa ennen kuin putoavat maahan asti. Aidosta sadepilvestä vettä sataa, ja sade voi kestää kohtalaisena useita tunteja. Sade on voimakkainta lähellä matalapaineen keskusta. Kaukana keskuksesta lämmin rintama ei välttämättä tuota lainkaan sadetta.

Kylmä rintama on usein lämmintä rintamaa voimakkaampi voimakkaampien paine- ja lämpötilagradienttien ansiosta. Siinä kylmä ilmamassa työntyy lämpimän ilmamassan alle. Nopealiikkeisen kylmän rintaman yhteydessä esiintyvä sade on usein kuuroittaista. Rintaman yhteydessä konvektio on sitä voimakkaampaa, mitä kosteampaa ja lämpimämpää on lämpimän ilmamassan ilma. Sadekuurojen yhteydessä voi esiintyä rakeita ja ukkosia. Kylmät rintamat jaetaan Karttunen et al. (2008) mukaan nopeisiin ja hitaisiin rintamiin. Nopean kylmän rintaman lähestyessä rintamaan liittyvä lähestyvä pilvisyys näyttää melko pystysuoralta. Se koostuu satavasta pilvestä (Ns) ja kuuropilvistä (Cb, cumulonimbus). Rintaman jälkipuoliskolla ilmamassa on tyypillisesti epävakasta ja siinä esiintyy monin paikoin kuuroja. Kylmät rintamat ovat hitaampia

siellä, missä painegradientti on heikompi eli taas kauempana matalapaineen keskuksesta. Rintamarakenne muistuttaa enemmän takaperin liikkuvaa lämmintä rintamaa. Rintama ylittää havaintopaikan ensin alapilvinä (Sc) ja satavina keskipilvinä (As, Ac, ja Ns).

Koska kylmä rintama on lämmintä rintamaa nopealiikkeisempi, matalapaineen kehittyessä kylmä rintama saavuttaa lämmintä rintamaa, ja lämpimän ilmamassan sektori pienenee. Alueella, jossa kylmä rintama on saavuttanut lämpimän rintaman, maan lämmin ilmamassa ei enää kosketa maata. Kuvatun kaltaista rintamarakennetta kutsutaan okluusiorintamaksi, jolla on sekä lämpimän- että kylmän rintaman ominaispiirteitä.

4.3 Tutkimuksessa käytetty data

Ikaalisen säätutka WRM200 on operationaalisessa käytössä, ja sen data on tallennettuna Ilmatieteen laitoksen tietokantaan. Data on periaatteessa vapaata dataa ja kaikille saatavilla. Tässä työssä analysoitu data on saatu Ilmatieteen laitokselta työn ohjaajan Saltikoffin toimesta. Vertailussa käytetään WRM200:n alimman korkeuskulman ($0,3^\circ$) PPI dataa. Data sisältää 5 min välein tehtyjä hetkellisen mittauksi. Mittauksien PPI-datasta on hyödynnetty tutkaheijastuvuustekijän arvoja.

Hyytiälän MRR-2:n data on Helsingin yliopiston tiedostopalvelimelta ladattu. Käytetty data sisältää 1 min keskiarvotettuja tutkaheijastuvuuden arvoja 60 metrin paikkaresoluutiolla. Data kattaa korkeudet 60 – 1800 m. Näiltä korkeuksilta on valittu korkeudet 60 - 960 m, jotka vastaavat parhaalla mahdollisella tavalla WRM200:n $0,3$ asteen PPI-mittauskorkeutta MRR-2:n yläpuolella. WRM200:n datan saatavuuden perusteella on MRR-2:n datasta myös valittu viiden minuutin välein mittauksia.

Datan käsittelyyn on hyödynnetty Python PyART-modulia. Sen avulla on tässä vertailussa piirretty PPI-kuvia (esimerkiksi kuva 14). Hyytiälän MRR:n datasta on laskettu minuutin aikakeskiarvot Python IMProToo-modulilla. Nämä keskiarvoistukset olivat suoraan ladattavissa yliopiston tietokannasta. Sekä WRM200:n että MRR-2:n datasta on laskettu lisäksi halutut keskiarvot hyödyntämällä edelleen Pythonia. Aikasarjojen ja hajontakuvioiden piirtämisessä on hyödynnetty Matlab-ohjelmistoa.

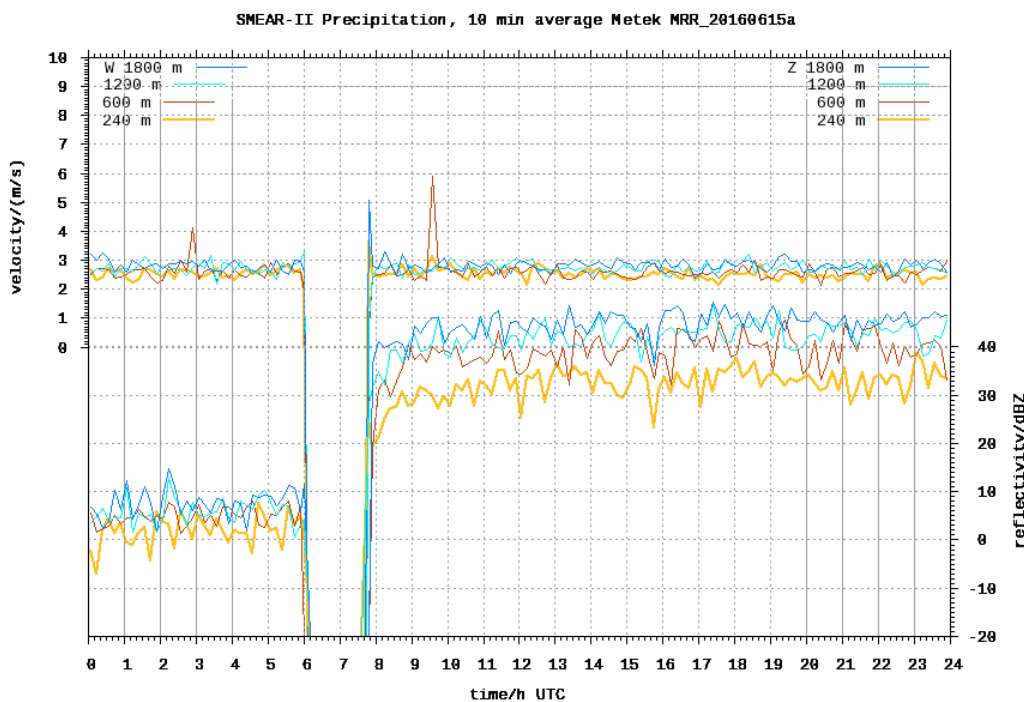
4.4 MRR-2 datan puutteet ja rajoitteet

MRR-2:n datan keräämisessä paljastui tutkimuksen aikana useita ongelmia. MRR-2 on Leskisen ylläpitämällä sivujen mukaan ollut toiminnassa koko kesän 2015 ajalta, mutta dataa kerätessä huomattiin, että päivän 16.07.2015 jälkeinen data oli jäänyt kopioimatta yliopiston tiedostoarkistoon. Tuolta kesältä vertailuun voitiin ottaa mukaan vain

kesäkuun ja heinäkuun alkupuoliskon datat. Vertailujakson kesien 2016, 2017 ja 2018 data löytyi tallennuslevykkeeltä.

Merkittävä ongelma oli myös lyhyemmät ajanjaksot, joilta mittauksia ei ole lainkaan tehty. Näitä ajanjaksoja on esimerkiksi huoltokatkoilta, jotka ovat kestäneet päivän tai pari, kuten 07. - 09.06.2015. Kesän 2015 aikana katkoksia datassa on kolmena päivänä. Seuraavana vuonna 2016 katkoksia on 21 päivänä, ja kesän 2017 vastaava luku on jopa 82 päivää. Kuvan 10 esimerkin mukaan MRR-2:n datassa on noin kahden tunnin katkos 06 UTC alkaen 15.06.2016.

Ennen katkosta tutkaheijastuvuuden arvo ryömii (engl. drifting) hieman ylöspäin ennen katkosta. Katkoksen jälkeen MRR-2 ilmoittaa tutkaheijastuvuuden arvo on selvästi harhainen. Samalta päivältä optinen sademittari parsivel ei havaitse sadetta. Vastaavaa ryömintää esiintyi koko aikajaksolla 2015-2018 katkospäivien lisäksi 24 päivänä.



Kuva 10: Esimerkki katkoksesta ja laatuongelmista MRR-2:n datassa 15.06.2016. Merkinnot kuten kuvassa 9. (Leskinen, 2019)

Tämän tutkimuksen vertailussa on haluttu välttää päiviä, jolloin MRR-2:n toiminta näyttää vialliselta. Vuoden 2018 kesänä MRR-2 kärsi lähes päivittäin katkoksista ja arvon ryömisestä. Siksi lopulta päädyttiin ratkaisuun, jossa kesän 2018 kaikki tapaukset jätettiin vertailun ulkopuolelle. MRR-2:n datan saatavuudesta ja laatutarkkailusta on tehty visuaalinen esitys värikoodein taulukkoon 4. Taulukkoon on merkitty viivalla päivät, joilta dataa on saatavilla vain rajallisesti tai koko päivän data

puuttuu. Rajoitetun datan päivien osuus ajanjaksolla 2015-2018 on merkittävä, jopa 70 %. Viivalla merkittyjä päiviä on 192 kun taas kokonaisuudessaan vertailujakso kattaa 276 päivää.

Taulukko 4: Taulukossa vuodet (v) 2015-2018 ja kuukaudet (k) kesäkuusta elokuuhun. Kutakin päivää vastaa yksi ruutu. Päivien värien merkitykset oheisessa taulukossa alapuolella.

[illegible]

	sadetapaus, joka mukana vertailussa
	ei sadetta tai vähäinen sade ei mukana vertailussa
-	MRR-2:n data hukassa
	MRR-2:lla outoa käyttäytymistä
-	MRR-2 pois päältä pienen hetken tai koko päivän

Katkoksien ja ryöminnän lisäksi MRR-2 näyttäisi kärsivän vaimenemisesta. Tämä huomattiin datan analyysivaiheessa. Vaimenemista kuvaa Leskisen sivulta lainattu MRR-2:n tutkaheijastuvuusmittaus (kuva 9). Siinä MRR-2 mittaa heikomman signaalin 1200 m ja 1800 m korkeudelta kuin 240 m ja 600 m korkeudelta kuuroissa 15 UTC ja 17 UTC. Signaalin vaimeneminen on luultavasti seurausta MRR-2:n antennille kertyvästä vedestä tai vaimenemisesta vesipisaroihin. Tämän kaltainen vaimeneminen on havaittavissa 1000 m korkeudelta ja korkeammalta, kun sateen intensiteetti on yli 30 dBZ. Tässä tutkimuksessa käytetään MRR-2 dataa vain korkeuksilta 60 - 960 m, eli alueella, jolla signaalin vaimeneminen ei ole erityisen voimakasta.

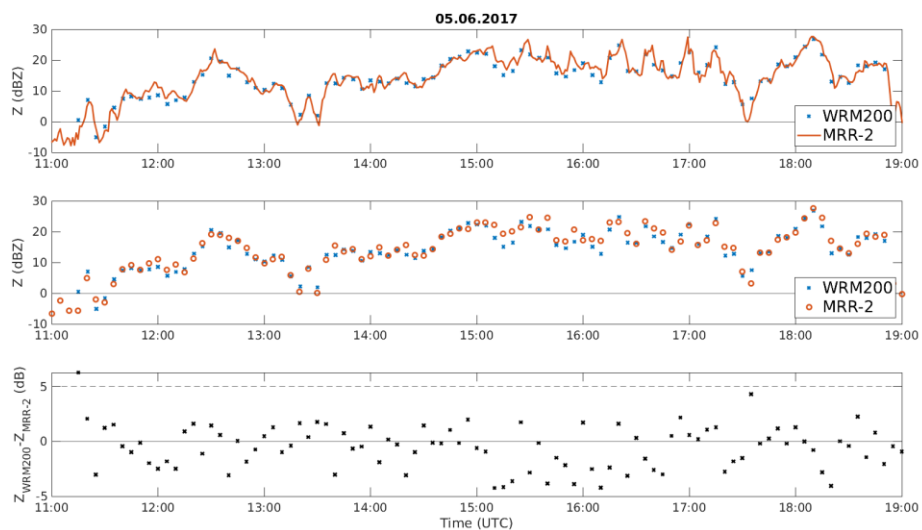
5. TULOKSET

5.1 Yksittäiset sadetapaukset aikasarjoissa

Kustakin päivästä on piirretty aikasarja, jossa on esitettyä tutkaheijastuvuustekijä Z (dBZ) sekä säätutkan, WRM200, että pienoissadetutkan, MRR-2, mittaamana. Aikasarjoista on mahdollista silmämääräisesti havaita, missä tutkaheijastuvuustekijän arvot ovat likipitään samat ja missä arvot poikkeavat toisistaan paljon. WRM200:n tutkaheijastuvuustekijän arvon poikkeama MRR-2:n vastaavasta arvosta on laskettu aikasarjojen yhteydessä. Koska vertailuissa oli mukana 44 päivää, kaikkien päivien aikasarjoja ei ole mahdollista näyttää tämän tekstin yhteydessä. Seuraavaksi kuitenkin joitakin valittuja tapauksia.

5.1.1 Tasaisen ja konvektiivisen sateen tyypilliset tapaukset

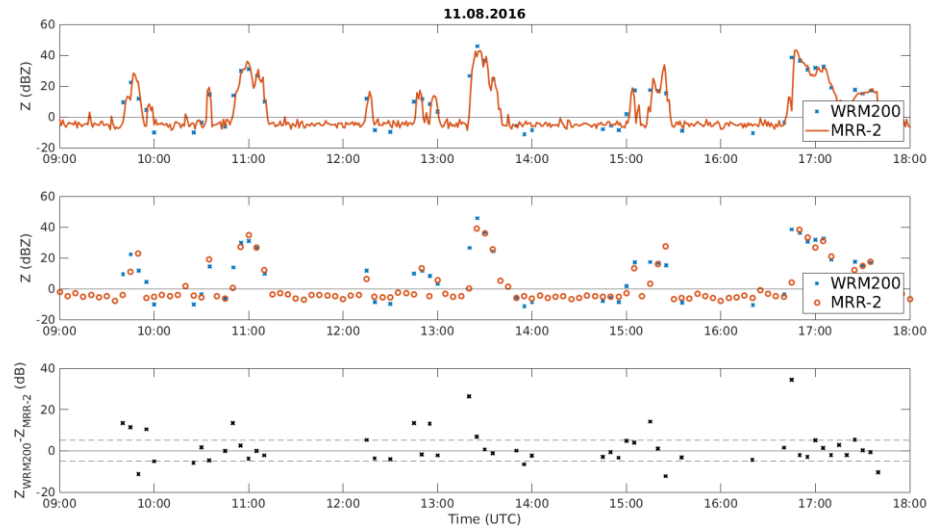
Odotettavissa on, että tasaisen sateen aikana WRM200 ja MRR-2 mittaamien tutkaheijastuvuuksien välillä ei ole suurta eroa. Tätä kuvaa hyvin tapaus 05.06.2017, jossa sade alkaa 11:30 UTC ja jatkuu aina 19:00 UTC asti (kuva 11). Z_{WRM200} ja Z_{MRR-2} välinen ero on lähes koko päivän alle 5 dBZ.



Kuva 11: Tasaisen sateen tyypillinen tapaus 05.06.2017. Kahdessa ylimmässä kuvassa on tutkaheijastuvuustekijä Z (dBZ) esitettyä ajan (UTC) funktiona. Keskimmäisessä kuvassa esitettyä WRM200:n mittaama Z (siniset raksit) ja MRR-2:n mittaama Z (punaiset ympyrät) Hyytiälässä. Alimmassa kuvassa keskimmaisen kuvan datapisteiden ero $Z_{WRM200} - Z_{MRR-2}$ (dB) (mustat raksit).

On odotettavissa myös, että konvektiivisen sateen aikana WRM200:n ja MRR-2:n mittaamien tutkaheijastuvuuksien välillä esiintyy suuria eroja. Erojen voimakkuutta kuvaa hyvin tapaus 11.08.2016 (kuva 12), jossa 09 UTC ja 18 UTC välillä Hyytiälässä

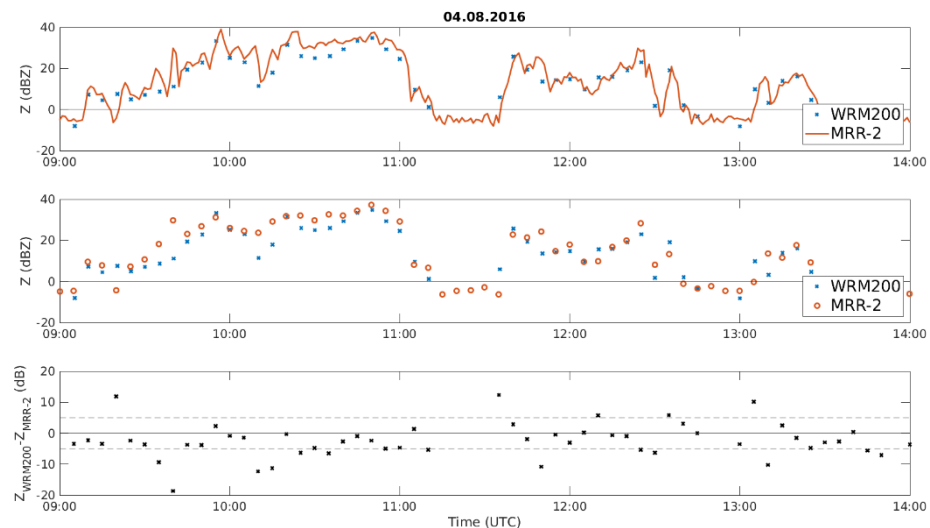
esiintyy viisi noin puolen tunnin kestoista sadekuuroa. Voimakkaimmat erot tutkaheijastuvuuksien välillä on mitattu noin kello 13:30, jolloin $Z_{WRM200} = 20 \text{ dBz}$ ja $Z_{MRR-2} = 0 \text{ dBZ}$ sekä kello 16:45, jolloin $Z_{WRM200} = 40 \text{ dBz}$ ja $Z_{MRR-2} = 10 \text{ dBZ}$.



Kuva 12: Konvektiivisen sateen tyypillinen tapaus 11.08.2016. Merkinnot kuvan 11 tapaan.

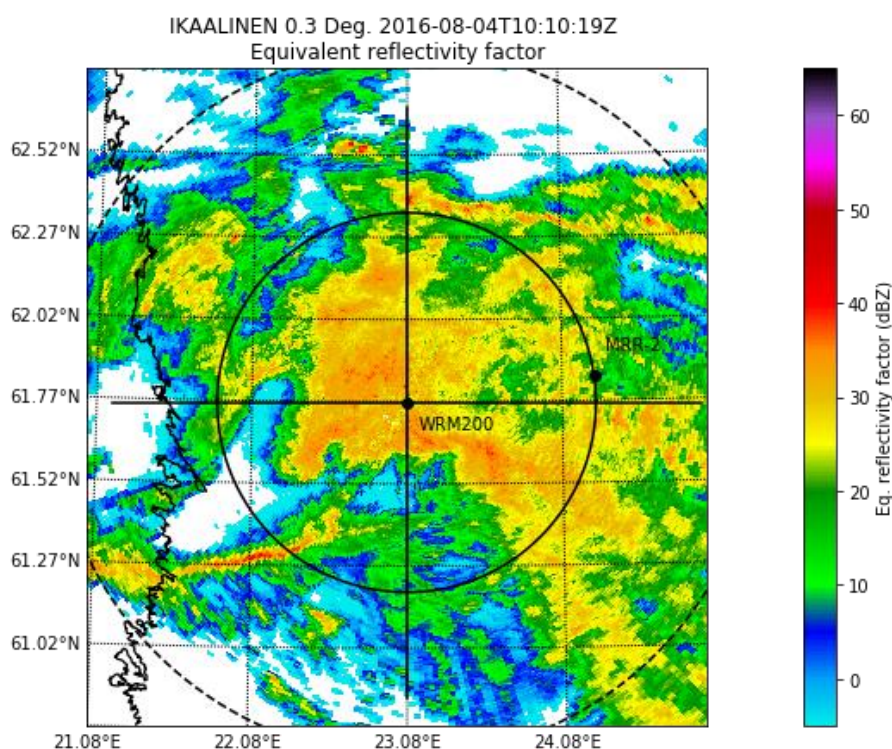
5.1.2 WRM200:n määrän suojakuvun aiheuttama vaimennus

Näiden lisäksi vertailussa esiintyi usein tilanne, jossa WRM200:n arvo on vähän, mutta systemaattisesti MRR-2:n arvoa pienempi. Tästä esimerkkinä aikasarja kuvassa 13.



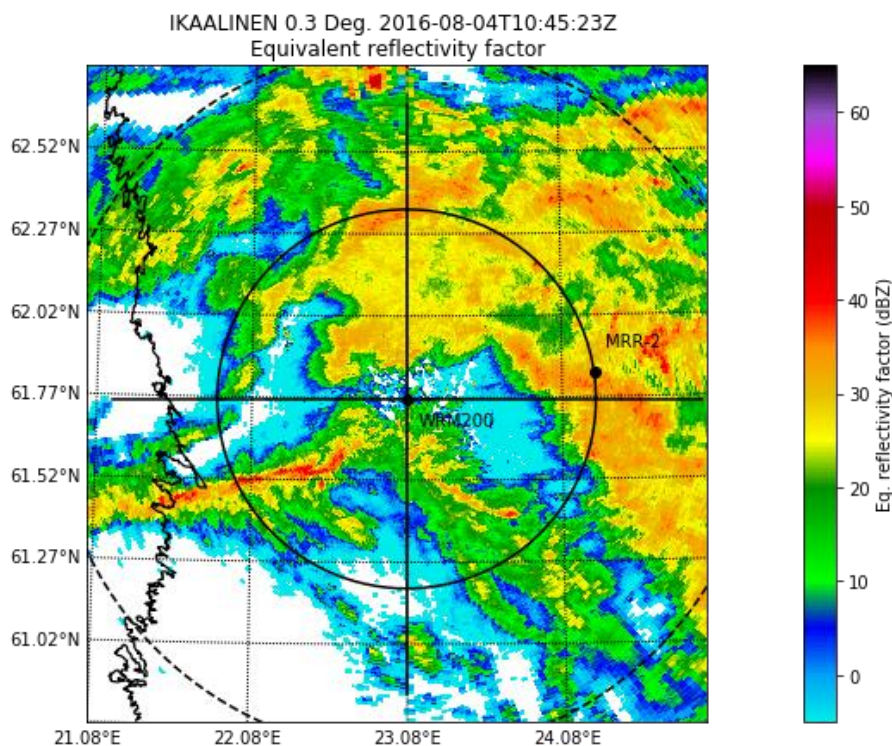
Kuva 13: WRM200:n tutkaheijastuvuus on MRR-2:n tutkaheijastuvuutta pienempi 10:00 -10:45 UTC. 10:45 UTC WRM200 mittaama tutkaheijastuvuus tavoittaa MRR-2:n mittaaman tason. Merkinnot kuvan 11 tapaan.

Kuvassa 13 sade alkaa kahden tunnin kestävällä sateella, jossa tutkaheijastuvuus nousee noin 37 dBZ tasoon asti. WRM200:n mittaama tutkaheijastuvuus on MRR-2:n vastaavaa pienempi välillä 10:00 – 10:45 UTC. Ero on suurimmillaan 10:10 UTC, kun WRM200 mittaa arvon 11,45 dBZ ja MRR-2 arvon 23,82 dBZ. Tilanteessa kyse on ilmeisesti WRM200 signaalin vaimeneminen märkään säätutkan suojakupuun. Tätä olettamusta tukee kuva 14, jossa nähdään intensiivinen laaja-alainen sadealue, jonka intensiteetti on voimakas WRM200 kohdalla (oranssi), mutta WRM200:n ja MRR-2:n välisellä matkalla ei ole erityisen voimakkaita kaikuja. Välimaastossa sateen intensiteetti heikkoa (vihreä), joten kyseessä ei luultavamminkaan ole signaalin vaimeneminen vesisateeseen.



Kuva 14: Tilanne, jossa WRM200:n signaalia vaimentaa luultavimmin tutkan märkä suojakupu. Ikaalisen WRM200 säätutkan korkeuskulmalla 0,3° mitatussa PPI-tutkatuotteessa on väriskaalalla esitettyä ekvivalentti tutkaheijastuvuustekijä. Keskipisteessä WRM200 ja 64,4 km etäisyydellä MRR-2.

Kuvassa 13 ajanhetkellä 10:45 tilanne on tasaantunut siten, että WRM200:n mittaama tutkaheijastuvuustekijä on 33,37 dBZ ja MRR-2:n vastaava 34,34 dBZ, jolloin näiden arvojen välille jää vain pieni ero.

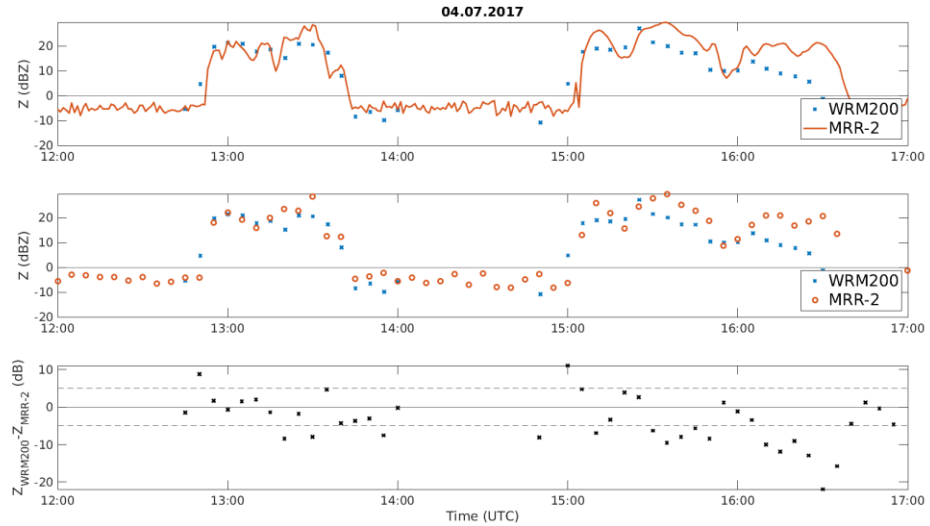


Kuva 15: Tilanne, jossa WRM200:n signaali ei enää ole merkittävästi heikompi MRR-2:n mittaamaa arvoa. Merkinnät kuvan 14 tapaan.

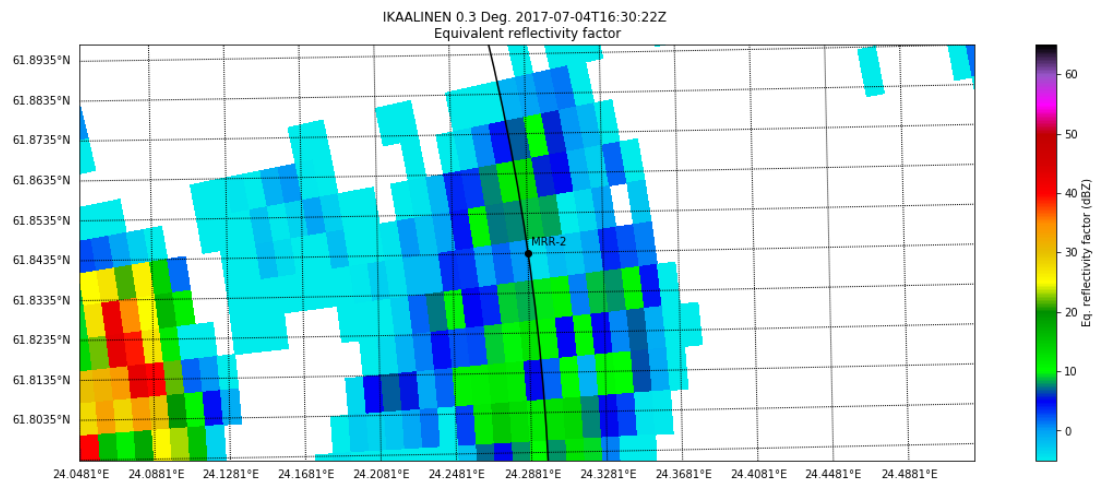
Kuvasta 15 nähdään, että WRM200:n välittömässä läheisyydessä ei enää ole voimakasta tutkakaikua. MRR-2:n yläpuolella sateen intensiteetin taso on noussut, mikä näkyy myös kuvan 13 tutkaheijastuvuustekijän kasvussa.

5.1.3 WRM200:n signaalin vaimeneminen kovassa vesisateessa

04.07.2017 WRM200 säätutkan mittaama tutkaheijastuvuustekijä MRR-2:n yllä on huomattavasti MRR-2:n mittaamaa arvoa pienempi välillä 15 – 17 UTC. Tätä tilannetta esittää aikasarja (kuva 16) ja kuva pikseleistä (kuva 17). Suurimmillaan Z_{WRM200} ja Z_{MRR-2} arvojen ero on ajanhetkellä 16:30, jolloin Z_{WRM200} on -1,35 dBZ ja Z_{MRR-2} on 22,50 dBZ. Hetkestä on piirretty PPI-kuva ja siitä suurennettu kuva yksittäisistä pikseleistä MRR-2:n ympäristöstä. Kuvan 17 perusteella nähdään voimakas intensiivinen kuuro MRR-2:n länsipuolella. Sadekuuron tutkaheijastuvuus (punainen) on noin 40 dBZ.



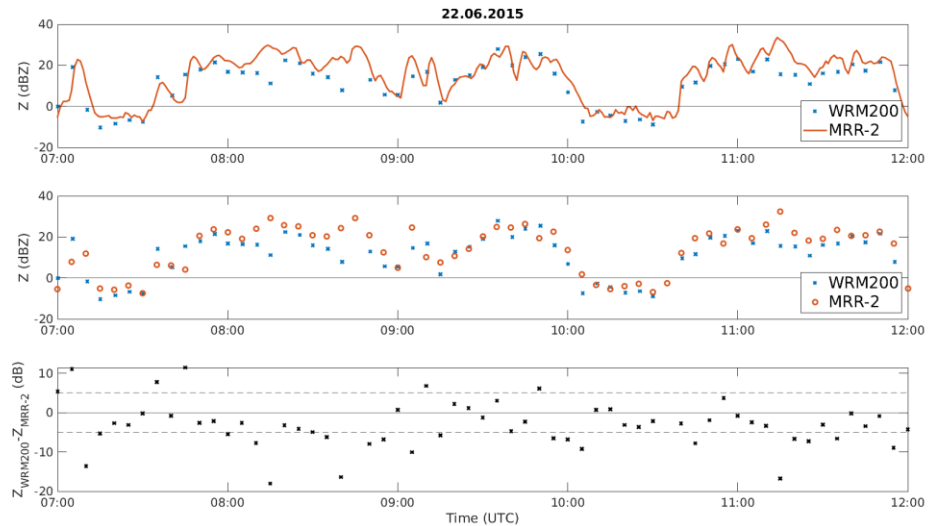
Kuva 16: WRM200:n tutkaheijastuvuus on selvästi MRR-2:n tutkaheijastuvuutta pienempi 15-17 UTC. Merkinnät kuvan 11 tapaan.



Kuva 17: WRM200:n tutkaheijastuvuus MRR-2:n ympärillä. Keskipisteessä MRR-2.

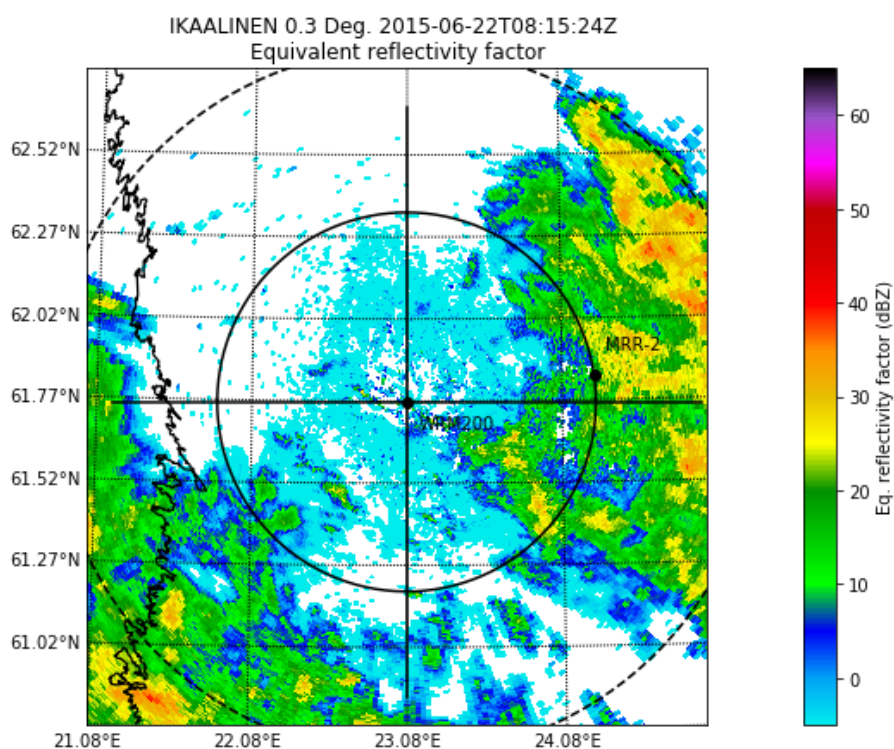
5.1.4 WRM200:n signaalin voimakas selittämätön vaimeneminen

Kaikille sadetapauksissa esiintyville WRM200 signaalin vaimenemisille ei vertailun puitteissa ole löytynyt selitystä. Voimakas WRM200:n signaalin vaimeneminen kuvan 18 aikasarjassa aikavälillä 08:00 – 09:00 UTC on tarkasteltu tilannetta vastaavan PPI-kuvan (kuva 19) avulla.

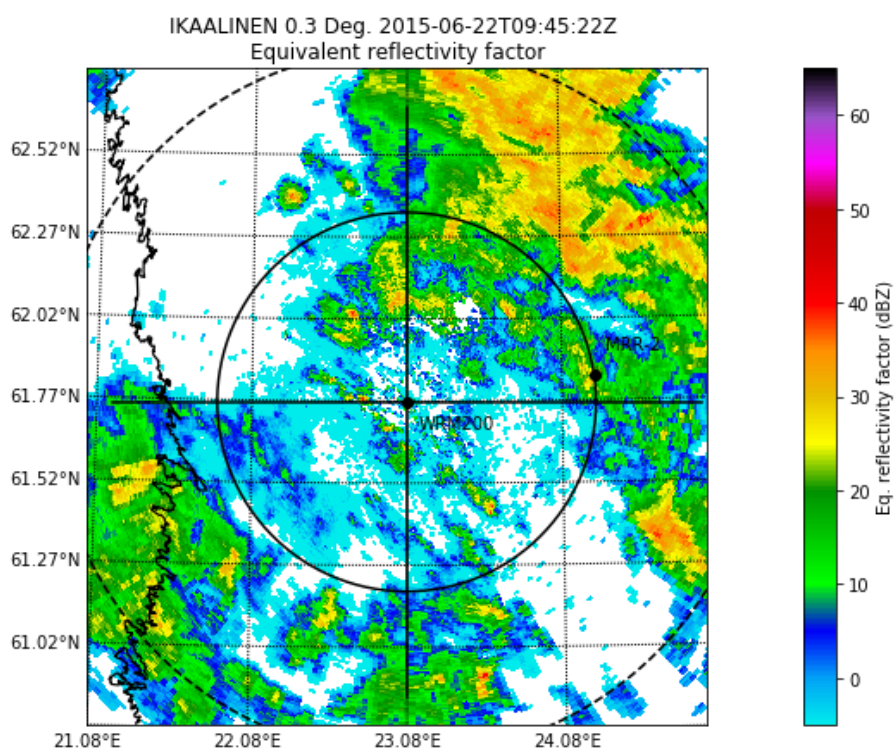


Kuva 18: WRM200:n tutkaheijastuvuus on MRR-2:n tutkaheijastuvuutta huomattavasti pienempi 8-9 UTC ja myöhemmin 11 - 12 UTC. Merkinnät kuvan 11 tapaan.

Ajanhetkellä 08:15 WRM200:n mitaama tutkaheijastuvuus on vain 11,11 dBZ kun taas MRR-2:n vastaava arvo on 29,13 dBZ. Tilanne näkyy kuvassa 19. Tilanne on erikoinen, sillä PPI-kuvasta näkyy, että syynä ei voi olla märän suojakuvun aiheuttama vaimennus eikä WRM200:n tutkasignaalin etenemisvaimeneminen vesisateeseen matkalla WRM200:lta MRR-2:lle ja takaisin. Tilanteen edetessä aikavälille 09 - 10 UTC WRM200:n ja MRR-2:n arvot vastaavat jälleen hyvin toisiaan. Hetkellä 09:45 UTC arvot ovat 24,07 dBZ WRM200:lla ja 26,42 dBZ MRR-2:lla. Vertaamalla tilanteen PPI-kuvaa (kuva 20) ajanhetken 08:15 tilanteeseen (kuva 19) ei näissä kahdessa tilanteessa ole havaittavissa mitään merkittävää eroa.



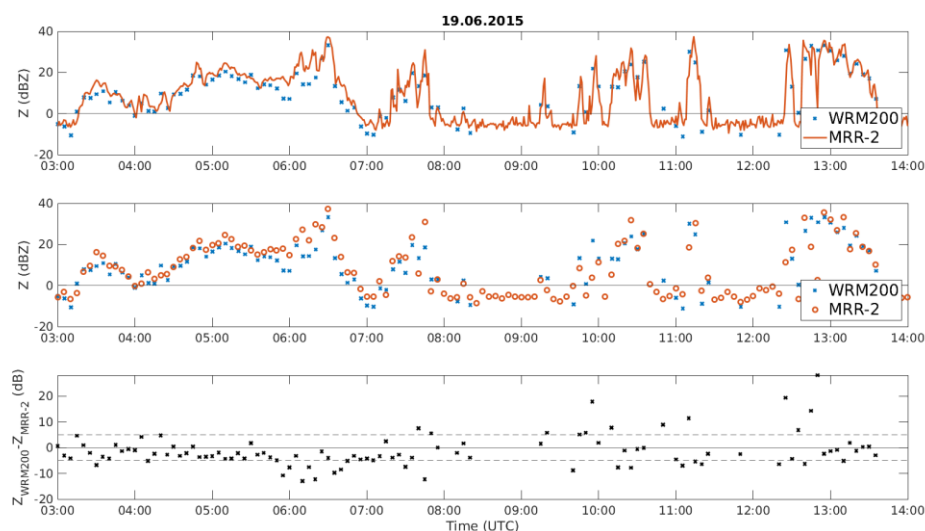
Kuva 19: WRM200:n signaali on ajanhetkellä 08:15 UTC heikompi kuin MRR-2:n. Merkinnät kuvan 14 tapaan.



Kuva 20: Tilanne, joka on näennäisesti hyvin samankaltainen kuvan 19 tilanteen kanssa. Tässä kuitenkin WRM200:n ja MRR-2:n mittaamat tutkaheijastuvuustekijät vastaavat hyvin toisiaan toisin kuin kuvan 19 tilanteessa. Merkinnät kuvan 14 tapaan.

5.1.5 Paikka- ja aikaresoluutioiden erojen vaikutus

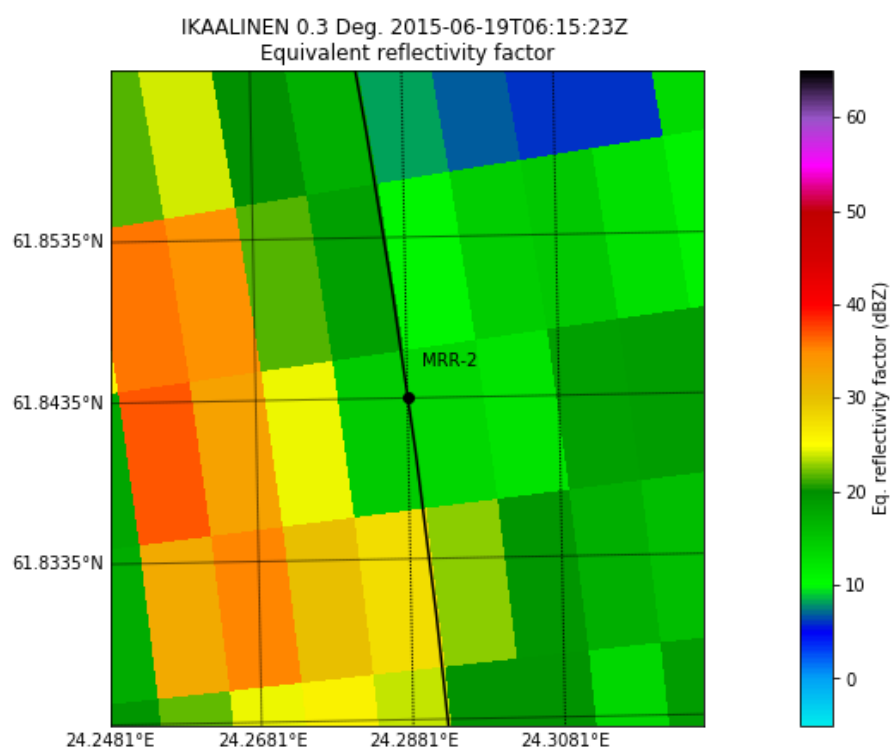
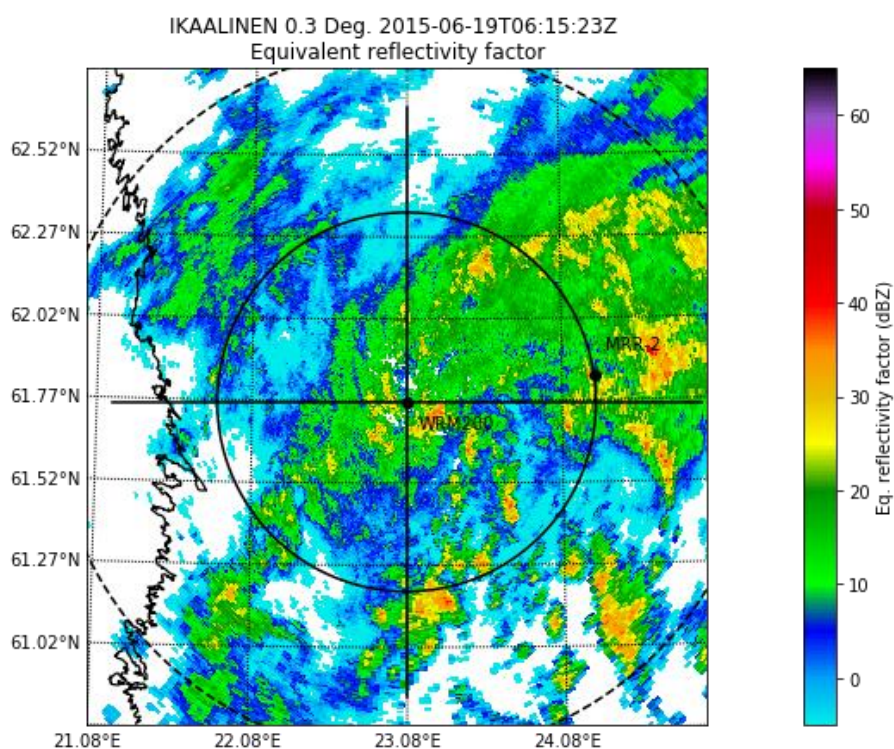
Kuvassa 21 on päivän 19.06.2015 aikasarja. Kuten aikasarjasta nähdään, on päivän aikana ensin laajempi tasaisen sateen alue ja myöhemmin sade muuttuu kuuroluonteiseksi.



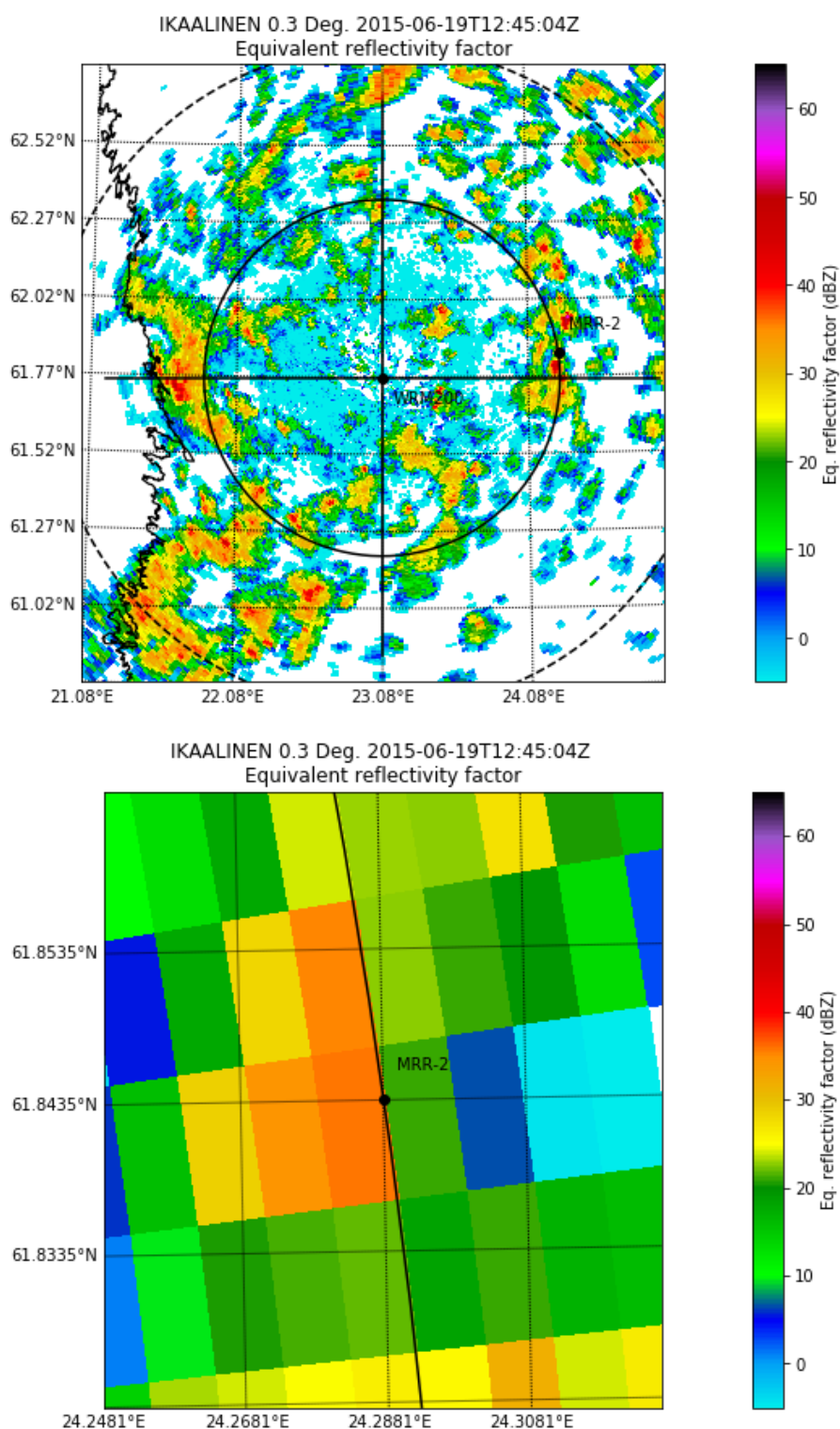
Kuva 21: Sadetapauksen aikana on aluksi tasaista sadetta ja myöhemmin konvektiivista sadetta 19.06.2015. Merkinnät kuten kuvassa 11.

Tasaisen sateen aikana tutkaheijastuvuustekijän arvot WRM200:lla ja MRR-2:lla mitattuna vastaavat aluksi toisiaan hyvin. Kuitenkin tasaisen sateen loppupuoliskolla noin kello 05:45 - 06:30 UTC WRM200:n tutkaheijastuvuustekijän arvot jäävät selvästi alle MRR-2 vastaavat mitatut arvot. Tähän voi olla syynä se, että WRM200 tutkasäde vaimenee edetessään sadealueen läpi. Tämän tutkimiseksi on piirretty kuva 22. Konvektiivisen sateen osuudella 09:00 - 13:00 erot WRM200:n ja MRR-2:n mittauksien välillä ovat paikoin hyvinkin suuria. Tältä osuudelta on valittu hetki 12:45. Hetkeltä on piirretty kuva 23.

Kuva 22 viittaa mahdolliseen vaimenemisefektiin. Siinä WRM200 tutkasäde kulkee melko voimakkaan sadealueen läpi. Tämä näkyy hyvin alemmasta kuvasta, jossa yksittäiset vaikutustilavuudet ovat erotettavissa. Tutkakeila kulkee intensiivisen sadealueen läpi juuri ennen Hyytiälää. Voimakkain kaiku kuvan alakuvassa 22 on 37 dBZ (oranssi) noin 2 km päässä MRR-2:sta. MRR-2:n yläpuolella kahden vaikutustilavuuden kaiut puolestaan vain 15 dBZ ja 14 dBZ.



Kuva 22: Ylemmän kuvan merkinnät kuvan 14 tapaan. Alemmassa kuvassa keskipisteessä MRR-2.



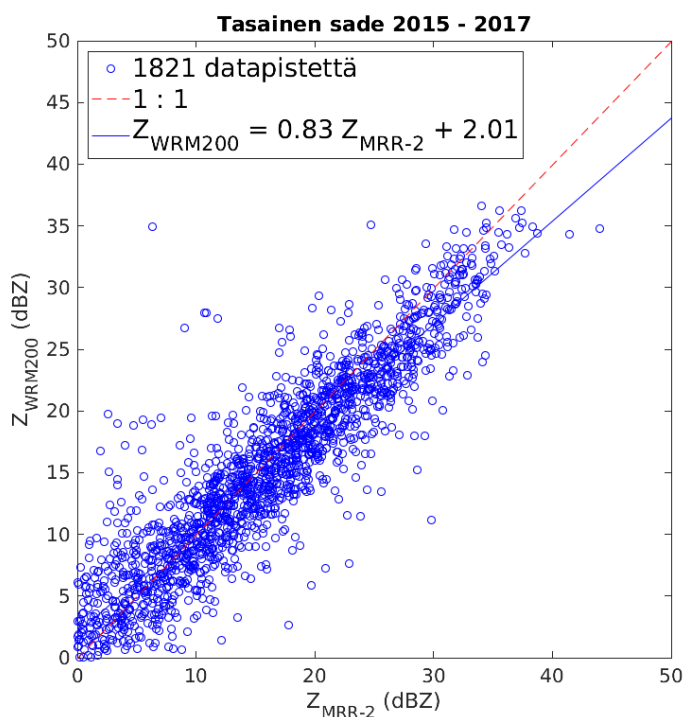
Kuva 23: Vierekkäisten vaikutustilavuuksien tutkaheijastuvuustekijöiden arvot ovat 36 dBZ (oranssi) ja 21 dBZ (vihreä). Merkinnyt kuvan 22 tapaan.

Myöhemmin saman päivänä 19.06.2015 kuurosateiden aikana tutkaheijastuvuustekijät WRM200:lla ja MRR-2:lla mitattuna eroavat selvästi useammin toisistaan. Kuvaparia 23 katsottaessa nähdään, että kuuroalueet ovat hyvin paikallisia, ja sateen paikallinen

vaihtelu WRM200:n mittaamalla alueella liian suurta vertailun tekemiseksi. Sadekuurot ovat liian pienialaisia ja nopealiikkeisiä verrattuna WRM200:n paikka- ja aikaresoluutioon. Voi olla, että WRM200 kahden vaikutustilavuuden (yhteensä 1 km^3) sisällä on sadekuuro, joka ei kata koko aluetta. Näissä tilanteissa sadetta saattaa osua MRR-2 kohdalle paljon tai ei ollenkaan. Alakuvassa 23 yksittäisten vierekkäisten vaikutustilavuuksien välillä tutkaheijastuvuustekijöiden arvot ovat 36 dBZ (oranssi) ja 21 dBZ (vihreä). Kahden vierekkäisen arvon ero voi olla siis verrattain suuri.

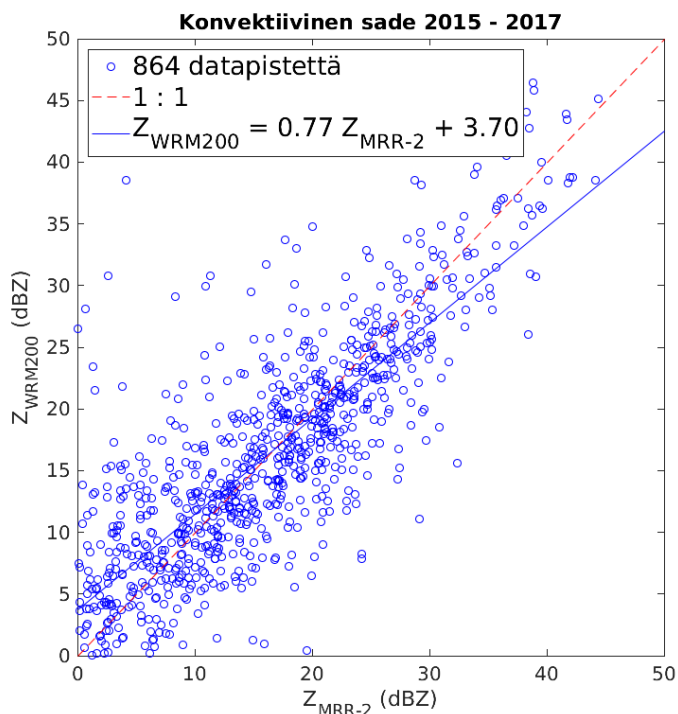
5.2 Koko vertailujakso hajontakuvioiden

Koko vertailujaksolta on piirretty hajontakuviot (Kuvat 24 ja 25), joissa x-akselilla on MRR-2:n mittaama tutkaheijastuvuustekijä ja y-akselilla WRM200:n vastaava mittaus. Odotusten mukaisesti datapisteet asettuvat melko osuvasti diagonaalin tuntumaan. Kuviin on laskettu sovitus ja sovituksen yhtälöistä nähdään, että tasaisen sateen tilanteessa yhtälö on keskimäärin lähempänä katkoviivalla esitettyä diagonaalia kuin konvektiivisen sateen tilanteessa. Hajontakuvioiden RMS-virhe (engl. sanoista root mean squared) kuvastaa otoksen hajontaa. RMS-virhe on tasaisen sateen tapauksissa 3,36 dB ja konvektiivisen sateen tapauksissa 5,35 dB.



Kuva 24: WRM200:n ja MRR-2:n tutkaheijastuvuustekijöiden välinen hajonta tasaisen sateen tapauksissa kesinä 2015 – 2017. Siniset ympyrät edustavat vertailussa käytettyjä

keskiarvotettuja mittauksia. Sinisellä on ympyröihin sovitettu käyrä. Punaisella katkoviivalla diagonaali.



Kuva 25: WRM200:n ja MRR-2:n tutkaheijastuvuustekijöiden välinen hajonta konvektiivisen sateen tapauksissa kesinä 2015 – 2017. Merkinnot kuvan 24 tapaan.

6. POHDINTA

Koska säätutka on laajalti käytetty laite ja säätutkaverkosta muodostetut tutkatuotteet ovat käytössä sään seuraamisessa ja sään kehityksen ennustamisessa, on hyvä, että uusia menetelmiä säätutkamittausten kalibroimiseen kehitetään. Tämän vertailun tarkoitus on lisätä tietoa siitä, miten MRR-2:n mittaama tutkaheijastuvuustekijän arvo vertautuu WRM200 mallisen säätutkan mittaamaan tutkaheijastuvuustekijään.

Vertailun pohjalta voidaan sanoa, että tasaisissa kesäsateissa tutkien verrattavuus on parempi kuin konvektiivisissa kesäsateissa. Tasaisessa sateessa pisarakokojakauma on homogeeninen ja sadealueet ovat laajoja, mikä parantaa tasaisen sateen aikana tehdyn vertailun tulosta. Konvektiivisessa sateessa pisarakoko on epähomogeeninen ja niissä myös rakeiden esiintyminen on mahdollista, mikä puolestaan vaikuttaa vertailuun heikentäen verrattavuutta.

6.1 Otoksen edustavuus

Tutkimuksessa käytetty otos on valittu siten, että siinä ei esiintyisi sateen eri olomuotoja. Matalin WRM200:n korkeuskulma ja tasaisiin kesäsateisiin keskittyminen takaavat sen, että otoksessa esiintyy ainoastaan vesisadetta. Alle kilometrin korkeudessa kesäsateissa sade on pääsääntöisesti olomuodoltaan vettä, sillä sulamiskerros on kesällä korkeammalla mittaustulosten yläpuolella. Otoksen valintaa voidaan pitää tämän perusteella hyvin harkittuna.

Tarkastellessa koko vertailujaksoa eli kesiä 2015 – 2018 pienoissadetutkan MRR-2 toimintavarmuus on ollut heikko. Taulukon 4 mukaan sadepäiviä ei ole saatu otokseen tasaisesti koko jaksolle, vaan on jouduttu tyytymään päiviin, joilta MRR-2:n data on saatavilla. MRR-2:n toimintavarmuudessa esiintyvät puutteet heikentävät otoksen edustavuutta.

6.2 Tuloksiin vaikuttavia tekijöitä

Tutkimuksen tuloksena esitetyt hajontakuvioiden tehdyt sovitukset WRM200:n ja MRR-2:n tutkaheijastuvuuksien välillä (kuvat 24 ja 25) antavat varmistuksen sille, että laitteiden välillä on mahdollista tehdä vertailua, mutta että tuloksiin vaikuttaa useita tekijöitä, joita on hyvä tarkastella tapauskohtaisesti.

Yksityiskohtaisemman tarkastelun perusteella on havaittavissa erilaisia tekijöitä, jotka aiheuttavat virhettä mittauksiin. Tutkasignaalin vaimeneminen märkään antenniin, märkään antennin suojakuppuun sekä intensiiviseen vesisateeseen ovat tutkimuksen perusteella isoimmat vertailuun vaikuttavat tekijät. Tästä on osoituksena tulokset-osiossa läpikäydyt sadetapaukset. Vaimenemiseen liittyvissä virheissä korjauskertoimien määrittäminen voi olla vaikeaa. Kuivan suojakuvun aiheuttama vaimeneminen on otettu huomioon WRM200:n signaalinkäsittelyprosessissa. Märän suojakuvun vaikutus signaaliin riippuu veden määrästä eikä siten ole vakio. Samoin tutkakeilassa esiintyvän vesisateen intensiteetti ei ole vakio, joten sen aiheuttaman vaimenemisen määrittäminen on haasteellista.

Vertailussa mahdollisesti virhettä ovat aiheuttaneet ei-meteorologiset kohteet vaikutustilavuudessa. Pirkanmaalla on paljon metsää, ja alueella liikkuu kesäisin paljon hyönteisiä ja lintuja. Tutkimuksen otoksessa voi olla mukana lintujen ja hyönteisten aiheuttamia kaikuja, jotka aiheuttavat virhettä vertailuun. Ei-meteorologisia kaiun aiheuttajia ei kuitenkaan tässä tutkimuksessa osattu tunnistaa tai poistaa datasta.

Tutkamittauksiin aiheuttaa virheitä myös muut ei-meteorologiset kohteet. Tuhka ja ilmavoimien käyttämä silppu aiheuttavat voimakkaita kaikuja. Tuulivoimalat, lentokoneet sekä meren aiheuttamat häiriöt ovat yleisiä virheiden aiheuttajia.

Auringosta tutkaan osuva säteily tai muun ulkoisen lähettimen säteily näkyvät samoin tutkakuvissa. PPI-kuvien silmämääräisen tarkastelun perusteella näitä häiriöitä tutkakuvissa ei vertailun aikana ole.

Tasaisen sateen päivinä Ikaalisen säätutkan WRM200 ja Hyytiälän pienoissadetutkan MRR-2:n vaikutustilavuuksien epäsuhta ei aiheuta ongelmia laaja-alaisen sateen ansiosta. Toisin on kuuroluonteisen sateen yhteydessä. WRM200 säätutkan vaikutustilavuudessa voi olla voimakas kuuro, joka ei kuitenkaan osu pienoissadetutkan MRR-2:n vaikutustilavuuteen. Tämän kaltaisessa tapauksessa MRR-2:n tutkaheijastuvuustekijän arvo voi poiketa Ikaalisen tutkaheijastuvuustekijän arvosta jopa yli kymmenen desibeliä.

WRM200 säätutkan aika- ja paikkaerotuskyky ovat ongelmissa konvektiivisessa sateessa, kun tarkastellaan tutkaheijastuvuustekijää MRR-2:n kapean tutkakeilan alueella noin 65 km etäisyydellä säätutkasta. MRR-2:n erotuskyky on parempi eli se havaitsee tarkemmin nopean vaihtelun sateen intensiteetissä pienellä alueella. Toisaalta erittäin rankan sadekuuron sattuessa MRR-2 kohdalle, ongelmaksi saattaa muodostua antennille kertyvä vesi, joka ei ehdi valua lautasantennilta pois. Tämä heikentää MRR-2:n havaitsemaa signaalia.

6.3 Pienin mahdollinen havaittava tutkaheijastuvuustekijä

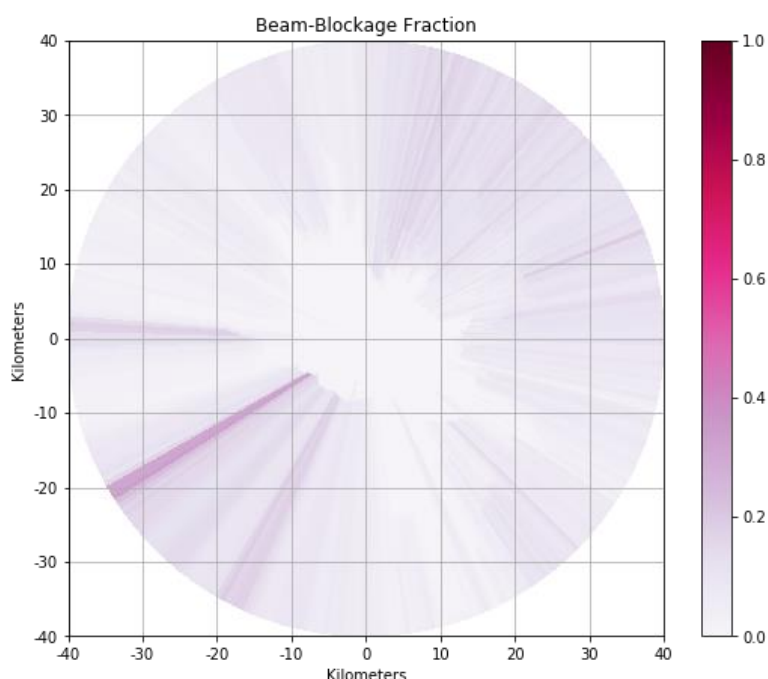
Molemmille tutkille on määritelty pienin mahdollinen havaittavissa oleva tutkaheijastuvuustekijä. Z_0 on kohinatasoa vastaava tutkaheijastuvuustekijä yhden kilometrin etäisyydellä tutkasta. MRR-2 pienoistutkan kohdalla eli noin 65 km etäisyydellä WRM200 säätutkasta selvästi kohinatasoa korkeammaksi tasoksi valittiin 0 dBZ. Havaitsemiskyvyn rajoittuminen aiheuttaa hajontakuviin vääristymää, jos kohinatasoa vastaavia ja sitä pienempiä arvoja ei poisteta datasta ennen hajontakuviodien piirtämistä. Tuloksissa esitetyissä hajontakuvissa kaikki alle 0 dBZ arvot on poistettu datasta ennen hajontakuvien piirtämistä ja suorien sovittamista. Myös suurimman mahdollisen intensiteetin havaitsemiselle on rajoituksensa. Suomessa on kuitenkin harvinaista, että näin intensiivisiä sateita esiintyy.

6.4 Säätutkan katvealueiden vaikutus vertailuun

Ikaalisten säätutkan katvealueet 40 kilometrin etäisyydelle tutkasta on kartoitettu Ilmatieteen laitoksen toimesta. Kun käytetään säätutkan alinta korkeuskulmaa, katvealueiden merkitys on suuri. Katvealueella tutkakeilan törmääminen kasvillisuuteen tai rakennukseen estää täydellisen havainnointikyvyn alueelle. Vaikka tutka on Ikaalisten keskustassa vesitornin päällä näennäisesti hyvällä sijainnilla,

ympäristön nousevat maastonmuodot aiheuttavat osittaisia katveja kauempana tutkasta (kuva 26).

Katvealueista huolimatta vertailussa on haluttu käyttää WRM200 säätutkan alinta korkeuskulmaa, sillä korkeammilla korkeuskulmilla olisi haittaa aiheuttanut sulamiskerros. Myös MRR-2:n mittauskorkeus vaikuttaa säätutkan korkeuskulman valintaan.



Kuva 26: Ikaalisten tutkan katvealueet 0,3° korkeuskulmalla. Punainen väri indikoi isompaa katveosuutta. Vaikka Ikaalisten tutka on näennäisesti korkealla paikalla vesitornin päällä, katvealueet ovat lounaan suuntaan merkittävät. (Ilmatieteen laitos)

6.5 Vertailunasettelun jatkokehitys

Vertailunasettelulla on merkitystä vertailun tuloksiin. Se vaikuttaa tarvittaviin keskiarvoistuksiin sekä tutkasignaalin matkaan ilmakehässä ja edelleen signaalin kokemaan vaimenemiseen. Jos MRR-2 pienoissadetutkaa halutaan käyttää WRM200 säätutkan kalibroimiseen, laitteet olisi hyvä asettaa noin 30 kilometrin etäisyydelle toisistaan, kun taas tässä vertailussa etäisyys oli noin 65 km. Siirtymällä 30 kilometrin etäisyyteen voitaisiin osittain välttyä ilmakehässä tapahtuvalta signaalin vaimenemiselta. Käyttämällä 30 km etäisyyttä Ilmatieteen laitos voisi hyödyntää kuvan 26 kaltaisia laskemiaan katvealueita valitakseen vertailunasettelun, jossa säätutka ei kärsi lainkaan katveesta MRR-2:n suuntaan.

Tutkijoiden Frech et al. (2017) vertailuasetelmassa säätutka ja pienoissadetutka ovat noin 100 m etäisyydellä toisistaan. Molemmat tutkat mittaavat siinä vierekkäin alhaalta suoraan ylös ja mittaukset on suoritettu noin 650 m korkeudella maan pinnasta. Vaikka tutkien vaikutustilavuuksilla on Frech et al. (2017) tutkimuksessa pienempi ero kuin tämän pro gradun vertailussa, on vertailu silti luultavasti vaatinut keskiarvoistuksia sekä tilavuuden että vähintäänkin laitteiden näytteenottotaajuuksien eroista johtuvan ajallisen resoluutioeron takia. Lisäksi on hyvä ottaa huomioon säätutkan kohinataso lähellä tutkaa. Voi olla parempi asettaa tutkat riittävälle etäisyydelle toisistaan ja välttää turha virhe.

6.6 MRR-2 pienoistutkan hyvät ja huonot puolet

Tutkimus lisäsi tietoa MRR-2 pienoistutkan käytettävyydestä. Huomattiin, että kesäaikana, jolloin MRR-2 ei ole aktiivisesti Helsingin yliopiston tutkimuskäytössä, laitteen toimintavarmuus on heikko. Vaikka valmistaja Metek kehuu laitetta helppokäyttöiseksi ja halvaksi, tämä vertailu osoittaa, että laite ei toimi itsestään. Laitteen käytön varmistamiseksi olisi luotava mielellään automaattinen virheilmoitusjärjestelmä, joka ilmoittaa käyttäjälle, jos laitteessa esiintyy ongelmia. Laitteen ylläpito ja mittausten laadun varmistaminen vaativat myös rahallisen panoksen.

On kuitenkin totta, että laite on pienen kokonsa puolesta helppokäyttöinen ja mielenkiintoinen hankintaehdotus. Laite on melko helppo käyttää kesällä, mutta miten pienoissadetutka selviytyy talvella, kun antennin päälle kertyy lunta ja jäätä? Käytettävyys kalibroinnissa ympäri vuoden on tärkeä asia mietittäväksi. Halutaanko laitetta käyttää ympäri vuoden vai riittäisikö kerran vuodessa tehty projektiluonteinen säätutkien mittausten tarkistus vertaamalla niitä pienoissadetutkan arvoihin?

Myös MRR-2 on mittalaite, joten myös se olisi kalibroitava ennen kuin sen mittaamia arvoja käytetään säätutkan kalibroimisessa. Tämä voitaisiin suorittaa ottamalla verrokiksi optinen sademittari parsivel.

7. YHTEENVETO

Kattavan säätutkaverkon ansiosta saadaan tärkeää tietoa sadealueiden liikkeistä ja sateen voimakkuudesta. Säätutka on laite, joka lähettää signaalipulsseja ja mittaa partikkeleista takaisin sironneen signaalin tehoa. Laitteen mittausten laadun varmistamiseksi tarvitaan laitteen ylläpitoa ja mittausten validointia.

Vertailu tehtiin, koska haluttiin selvittää, voidaanko MRR-2 kaltaista pienoissadetutkaa käyttää referenssinä WRM200 tyyppisen säätutkan kalibroinnissa. MRR-2 tyyppisen pienoissadetutkan hankkimiseen liittyviä kustannuksia ja siitä saatavia hyötyjä on hyvä punnita monelta kannalta ennen mahdollista hankintapäätöstä.

Vertailuun on valittu Ilmatieteen laitoksen operationaalisessa käytössä oleva WRM200 mallin säätutka Ikaalisista sekä Helsingin yliopiston tutkimuskäytössä oleva pienoissadetutka MRR-2 Hyytiälästä. Molemmat laitteet mittaavat tutkaheijastuvuustekijää, joka ilmoittaa vaikutustilavuudessa olevien partikkeliin lukumäärästä ja koosta riippuvaa heijastavuutta.

Laitteiden välinen vertailu on tehty perustuen dataan, joka on kerätty vuosien 2015, 2016, 2017 ja 2018 kesäsadetapauksista. Sadetapaukset on haluttu jakaa tasaisen ja konvektiivisen sateen tilanteisiin, sillä on odotettavissa, että tasaisessa sateessa verrattavuus laitteiden välillä on parempi.

Laitteiden keskinäisten paikka- ja aikaresoluutioerojen sekä niiden välisen noin 65 km etäisyyden vuoksi mittaustuloksia on käsitelty tekemällä niille tarpeelliset keskiarvotukset. Keskiarvotettuja tutkaheijastuvuustekijöitä verrataan toisiinsa hajontakuvioissa, joissa x-akselilla on MRR-2:n mittaama ja y-akselilla WRM200:n mittaama tutkaheijastuvuustekijä. Tasaisen sateen otokseen sovitettun suoran yhtälö on $Z_{WRM200} = 0.83 Z_{MRR-2} + 2.01$. Tämä tarkoittaa sitä, että tutkimusasettelun mukaisessa vertailussa näyttää siltä, että WRM200 aliarvioi voimakkaita ja yliarvioi heikkoja tutkaheijastuvuustekijöitä. Konvektiivisen sateen otokseen sovitettun suoran yhtälö on $Z_{WRM200} = 0.77 Z_{MRR-2} + 3.70$. On siis selvää, että MRR-2 tyyppistä pienoissadetutkaa on järkevämpi käyttää referenssinä vain tasaisen homogeenisen sateen tapauksissa.

Tasaisen sateen päivinä tutkaheijastuvuuksien ero on parhaimmillaan koko sadetapauksen ajan alle 5 dB. Toisaalta konvektiivisissa sadetilanteissa aika- ja paikkaresoluutioerot laitteiden välillä tuo vertailuun selvää hajontaa. Kuitenkin myös tasaisen sateen tilanteissa tuloksiin vaikuttaa monet tekijät. Säätutkan vastaanottama signaali on kokenut vaimenemista reitin varrella esiintyvään veteen joko märän suojakuvun tai intensiivisen vesisateen kohdalla. Tätä vaimennusta on vaikea korjata

mittaustuloksista, sillä sen suuruus riippuu veden määrästä. Myös MRR-2:n signaali vaimenee, jos antennin päälle kertyy paljon vettä. Kaiken kaikkiaan lopullisissa hajontakuvioissa (kuvat 24 ja 25) isompi otos datapisteitä samassa kuvassa pienentää yksittäisten virhetekijöiden aiheuttamaa virhettä.

Vertailun on tarkoitus antaa tuloksia hankintapäätöksen tueksi. Vertailu osoittaa, että ilmakehässä tapahtuvaa vaimenemista ja muita häiriötekijöitä on vaikea sulkea asettelusta pois. Jopa tasaisen sateen tapauksessa, jossa voisi kuvitella vertailun toimivan sujuvasti, tulosta ei voida käyttää absoluuttiseen säätutkan kalibroimiseen. Tämä johtuu siitä, että edes tasaisessa sateessa kaikki mittauksiin vaikuttavat tekijät eivät ole kontrolloitavissa, joten MRR-2:n mittaama tutkaheijastuvuustekijä ei saa täysin samaa arvoa WRM200 mittaaman tutkaheijastuvuuden kanssa. Tämän tyylinen vertailu olisi kuitenkin paljastanut, jos säätutkan arvot olisivat selvästi olleet harhaiset.

Lähteet

Bringi, V. ja V. Chandrasekar, 2001: *Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge, Yhdysvallat. 636 sivua.

Fabry, F., 2015: *Radar Meteorology: Principles and Practice*. Cambridge University Press, Cambridge, Yhdysvallat. 256 sivua.

Frech, M., M. Hagen ja T. Mammen, 2017: Monitoring the Absolute Calibration of a Polarimetric Weather Radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **34**, 599–615.

Huuskonen, A., M. Kurri ja I. Holleman, 2016: Improved analysis of solar signals for differential reflectivity monitoring, *Atmos. Meas. Tech.*, **9**, 3183–3192.

Holleman, I., A. Huuskonen, R. Gill ja P. Tabary, 2010: Operational Monitoring of Radar Differential Reflectivity Using the Sun. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **27**, 881–887.

Ilmatieteen laitos: Yleistä tietoa säätutkista, <https://ilmatieteenlaitos.fi/saatutkat> (11.02.2019).

Jensen, J. R., 2000: *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, Yhdysvallat. 544 sivua.

Leskinen, M. 2019: Parsivel-sademittarin sadekertymä ja Metek MRR-2:n tutkaheijastuvuustekijä, <http://www.atm.helsinki.fi/~mleskine/TESTBED/hyyt.html> (31.01.2019).

Meischner, P. (Ed.), 2004: *Weather Radar: Principles and Advanced Applications*. Sarja: Physics of Earth and Space Environments, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 337 sivua.

Metek: Metek Micro Rain Radar MRR-2 datasheet, <https://metek.de/product/mrr-2/#> (01.04.2019).

Paikkatietoikkuna: Karttakuva Ikaalisen ja Hyytiälän väliin jäävästä maastosta, <https://kartta.paikkatietoikkuna.fi/?lang=fi> (11.02.2019).

Posio, T., 2014: WRM200-säätutkan toiminta, huolto ja kalibrointi, Insinööritoimisto, Metropolia Ammattikorkeakoulu, 69 sivua.

Ryzhkov A., S. Giangrande, V. Melnikov ja T. Schuur, 2005: Calibration Issues of Dual-Polarization Radar Measurements, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **22**, 1138-1155.

Saltikoff, E., A. Huuskonen, H. Hohti, J. Koistinen ja H. Järvinen, 2010: Quality assurance in the FMI Doppler Weather Radar Network, *Boreal Environment Research*, **15**, 579-594.

Vaisala, 2013: Vaisala Weather Radar WRM200, B210698EN-E datasheet, <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/WEA-MET-WRM200-Datasheet-B210698EN-E-LOW.pdf> (01.04.2019).

Wolff, C., 2019: Radar range equation for weather radar, <http://www.radartutorial.eu/15.weather/wx05.en.html> (11.02.2019).

A) Yleinen säätutkayhtälö

Tutkan vastaanottama teho P_r antennin syötössä eli antennin sisäänmenossa on

$$1) \quad P_r = P_t \times \frac{G_t}{4\pi r^2} \times \sigma \times \frac{1}{4\pi r^2} \times \frac{1}{L_{at}} \times A_{eff} = \frac{P_t G_t \sigma G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4 L_{at}}, \quad \text{jossa}$$

$A_{eff} = \frac{G_r \times \lambda^2}{4\pi}$ on antennin efektiivinen sieppauspinta-ala.

L_{at} = ilmakehässä tapahtuva signaalin vaimeneminen.

r = mittaustilavuuden etäisyys tutkan antennista.

λ = aallonpituus.

G_t = antennivahvistus lähetyksessä.

G_r = antennivahvistus vastaanotossa.

P_t = lähetysteho antennin syötössä.

Säätutkan havaitsema tutkapoikkipinta σ on verrannollinen mittaustilavuudessa V_{ant} olevien sirottajien tutkapoikkipintojen summaan

$$2) \quad \sigma = V_{ant} \times \frac{1}{\Delta V} \sum_i^n \sigma_i, \quad \text{jossa}$$

σ_i = yksittäisen sirottajan sirontapoikkipinta

$\Delta V = 1 \text{ m}^3$ tilavuusalkio

Tutkan antennin keila valaisee pinta-alaltaan ellipsin muotoisen mittaustilavuuden. Mittaustilavuuden pituus, jossa kaikki mittaustilavuuden sirottajat vaikuttavat takaisin sironneeseen tehoon, on verrannollinen pulssinpituuden puolikkaaseen $\frac{\tau}{2}$.

$$3) \quad V = \pi a b h = \frac{\pi \theta \varphi r^2 \tau c}{8}, \quad \text{jossa}$$

$a = \frac{\theta r}{2}$ = ellipsin puoliakseli.

$b = \frac{\varphi r}{2}$ = ellipsin puoliakseli.

θ = antennin atsimuuttisuunnan -3 dB keilanleveys radiaaneina.

φ = antennin elevaatio-suunnan -3 dB keilanleveys radiaaneina.

$h = \frac{\tau c}{2}$ = mittaustilavuuden pituus.

τ = lähetyspulssin kesto.

c = valon nopeus.

Säätutkayhtälössä oletetaan, että antennin pääkeila valaisee -3 dB:n alueen Gaussisesti. Tämän johdosta mittaustilavuus V kerrotaan kertoimella $\frac{1}{2\ln(2)}$, jolloin saadaan antennin säteilykuvion paremmin huomioon ottava mittaustilavuus V_{ant} .

$$4) \quad V_{ant} = V \times \frac{1}{2\ln(2)} = \frac{\pi\theta\varphi r^2\tau c}{16\ln(2)}$$

Yksittäisen pyöreän sadepisaran sirontapoikkipinta Rayleigh alueella on

$$5) \quad \sigma_i = \frac{\pi^5 |K|^2 D_i^6}{\lambda^4}, \quad \text{jossa}$$

$|K| = \left| \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right|$ = veden suhteellisesta permittiivisyydestä ϵ_r riippuva kerroin. ϵ_r on taajuuden ja lämpötilan funktio. IRIS:n käyttämää arvoa ei kerrota manuaaleissa, mutta K on vedelle C-alueella luokkaa 0.91 – 0.93.
 D_i^6 = yksittäisen pyöreän vesipisaran halkaisijan kuudes potenssi.
 Sironnan Rayleigh -alue = $\lambda \gg D$, joka johtavalle pallopinnalle on $\lambda > 2\pi D$.

Kun kaavat 5) ja 4) sijoitetaan kaavaan 2) saadaan mittaustilavuuden tutkapoikkipinta

$$6) \quad \sigma = V_{ant} \times \frac{1}{\Delta V} \sum_i^n \sigma_i = \frac{\pi\theta\varphi r^2\tau c}{16\ln(2)} \times \frac{\pi^5 |K|^2 \sum_i^n D_i^6}{\Delta V \lambda^4} = \frac{\theta\varphi r^2\tau c \pi^6 |K|^2 Z}{16\ln(2)\lambda^4}, \quad \text{jossa}$$

$Z = \frac{1}{\Delta V} \sum_i^n D_i^6$ = tutkaheijastuvuustekijä, eli 1 m³ :n tilavuusalkiossa olevien pyöreiden vesipisaroiden kuudensien potenssien summa.

Yhdistämällä yhtälöt 1) ja 6) saadaan

$$7) \quad P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4 L_{at}} \times \frac{\theta\varphi r^2\tau c \pi^6 |K|^2 Z}{16\ln(2)\lambda^4} = \frac{P_t G_t G_r \theta\varphi \tau c \pi^3 |K|^2 Z}{1024\ln(2)\lambda^2 r^2 L_{at}} = \frac{Z}{C L_{at} r^2}$$

josta saadaan

$$8) \quad Z = P_r C L_{at} r^2 = \frac{P_r 1024\ln(2)\lambda^2 L_{at} r^2}{P_t G_t G_r \theta\varphi \tau c \pi^3 |K|^2}, \quad \text{jossa}$$

$$C = \frac{1024\ln(2)\lambda^2}{P_t G_t G_r \theta\varphi \tau c \pi^3 |K|^2} = \text{tutkavakio.}$$

B) Säättökayhtälö IRIS:ssä

IRIS laskee tutkaheijastuvuustekijän tutkan vastaanottimen ilmaisemasta tehosta P_r seuraavasti:

$$9) \quad Z = Z_0 \left(\frac{P_r - P_n}{P_n} \right) r^2, \quad \text{jossa}$$

Z_0 = kohinatehoa vastaava tutkaheijastuvuustekijä yhden kilometrin etäisyydellä tutkan antennista.

P_n = tutkan kalibroinnin yhteydessä mitattu kohinateho vastaanottimen ilmaisimella. HUOM! IRIS manuaaleissa $P_n = N$

P_r = signaalin teho vastaanottimella, ei antennin syötössä kuten yleisessä säättökayhtälössä.

Yhtälössä 9) oletetaan, että P_r on muotoa

$$10) \quad P_r = S g_r g_{rx} + P_n, \quad \text{jossa}$$

S = signaalin teho antennin syötössä.

g_r = tutkan kalibroinnista saatava vastaanotinketjun kokonaisvahvistus mitattuna kalibroitipisteen suuntakytkimiltä vastaanottimen ilmaisimelle.

g_r saadaan ZAUTO kalibroinnissa automaattisesti. $g_r > 1$.

$g_{rx} = 1/L_{rx}$ = SETUP:ssa määritettävä tutkan vastaanoton aaltoputkihäviöt antennin suuntakytkimiltä kalibroitipisteen suuntakytkimille mitattuna. IL:n tutkissa tähän termiin on myös sisällytetty CW -signaalilla kalibroinnista aiheutuva n. 1,4 dB:n häviö. $g_{rx} < 1$.

kalibroitipiste = WRM200 tutkissa kalibroitipiste on tutkakaapin suuntakytkin. H ja V -kanaville on omat suuntakytkimensä. IRIS:ssä kaikki kalibroinnissa tehtävät lisäykset ja vähennykset tehdään H ja V -kanavien kalibroitipisteiden suhteen.

IRIS laskee Z_0 :n seuraavasti:

$$11) \quad Z_0 = C_{iris} I_0 = \frac{1024 \ln(2) \lambda^2 L_{at}}{P_t g_{tx} G_t G_r \theta \varphi \tau c \pi^3 |K|^2} \times \frac{P_n}{g_r g_{rx}} = \frac{1024 \ln(2) \lambda^2 L_{at} L_{tx} L_{rx} P_n}{P_t G^2 \theta \varphi \tau c \pi^3 |K|^2 g_r},$$

jossa

$C_{iris} = C / g_{tx}$ = IRIS:n tutkavakio.

$g_{tx} = 1/L_{tx}$ = SETUP:ssa määritettävä lähetyspuolen häviö, johon on sisällytetty aaltoputkihäviöt. $g_{tx} < 1$.

P_t = on lähetysteho kalibrointipisteessä, ei antennin syötössä.

I_0 = tutkan antennin syöttöön redusoitu kohinateho, joka saadaan tutkan kalibroinnista.

$L_{at} = 0.016 \text{ dB/km}$ on ilmakehän hapen ja vesihöyryn aiheuttama kaksisuuntainen vaimennus. L_{at} ei sisällä sateen aiheuttamaa etenemisvaimennusta.

$G^2 = G_t G_r$, sillä kyseessä on monostaattinen tutka, jossa samalla antennilla lähetetään ja vastaanotetaan tutkapulssi.

HUOM! WRM200 tutkilla antennivahvistukseen G on sisällytetty kuivan suojakuvun läpäisyvaimennus $\sim 0.3 \text{ dB}$ sekä antennin syötön ja antennin suuntakytkimen välinen aaltoputkivaimennus $\sim 0.4 \text{ dB}$. Tutkapulssi kohtaa nämä vaimennukset sekä lähetyksessä että vastaanotossa. Tämä tulee huomioitua automaattisesti, sillä tutkayhtälössä G on toiseen potenssiin.

Kun kaavat 10) ja 11) sijoitetaan tutkaheijastuvuustekijän Z kaavaan 9), saadaan

$$\begin{aligned} 12) \quad Z &= Z_0 \left(\frac{P_r - P_n}{P_n} \right) r^2 = C_{iris} \times I_0 \times \left(\frac{P_r - P_n}{P_n} \right) r^2 \\ &= \frac{1024 \ln(2) \lambda^2 L_{at}}{P_t g_{tx} G^2 \theta \varphi \tau c \pi^3 |K|^2} \times \frac{P_n}{g_r g_{rx}} \times \left(\frac{S g_r g_{rx} + P_n - P_n}{P_n} \right) r^2 \\ &= \frac{1024 \ln(2) \lambda^2 L_{at} S r^2}{P_t g_{tx} G^2 \theta \varphi \tau c \pi^3 |K|^2} \end{aligned}$$

Kun verrataan yleistä säätutkayhtälöä 8) ja IRIS:n säätutkayhtälöä auki kirjoitetussa muodossaan 12) havaitaan, että ainut ero on $g_{tx} = 1/L_{tx}$ termin tulo mukaan, sillä $P_t g_{tx} =$ lähetysteho antennin syötössä.